SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

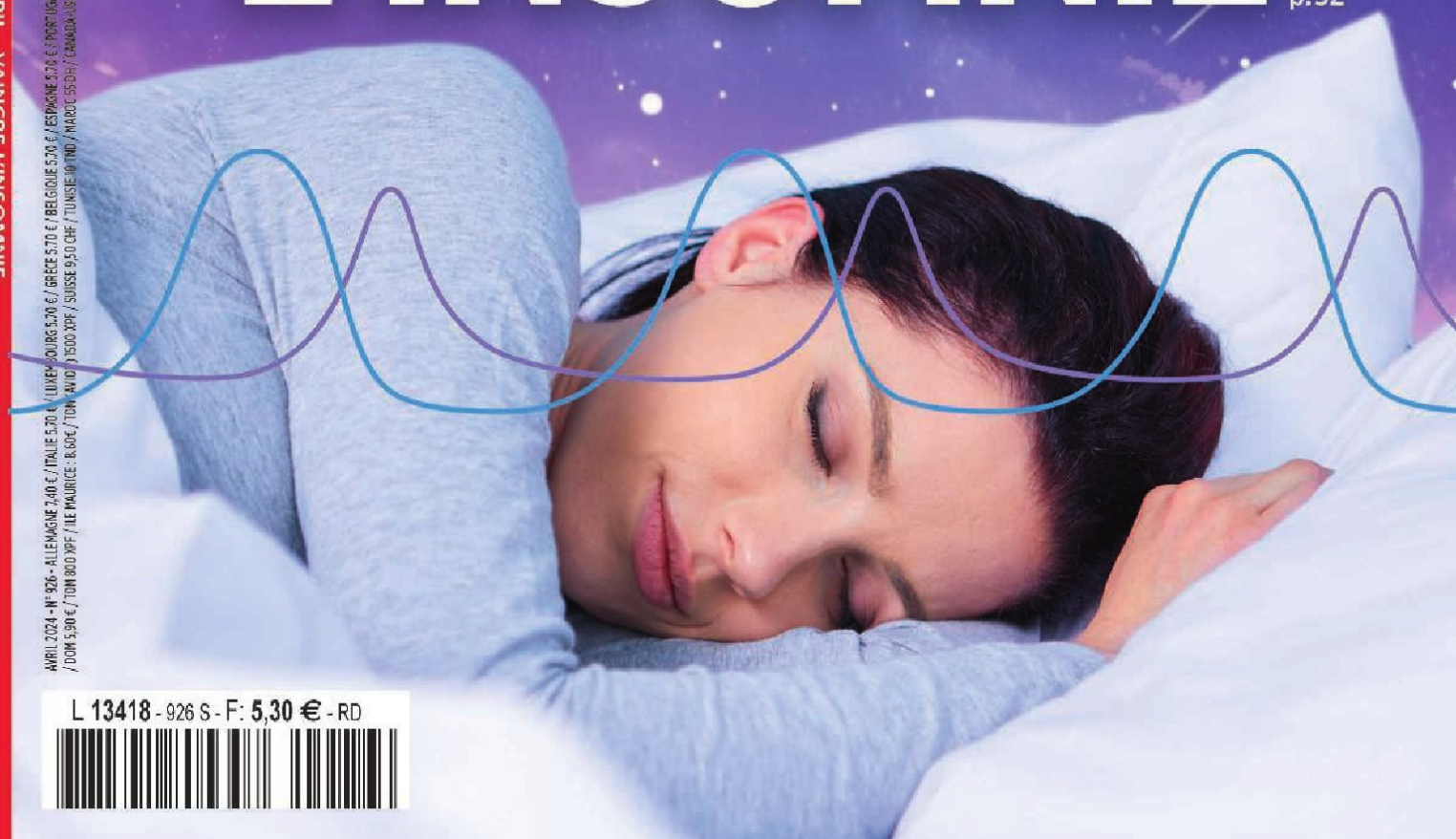
©STEPHEN ROUSTAIN - ZOOM TEAM/SHUTTERSTOCK

FORÊT AMAZONIENNE
Découverte d'une civilisation précolombienne
p.78

Nouveaux traitements

VAINCRE L'INSOMNIE

p.52

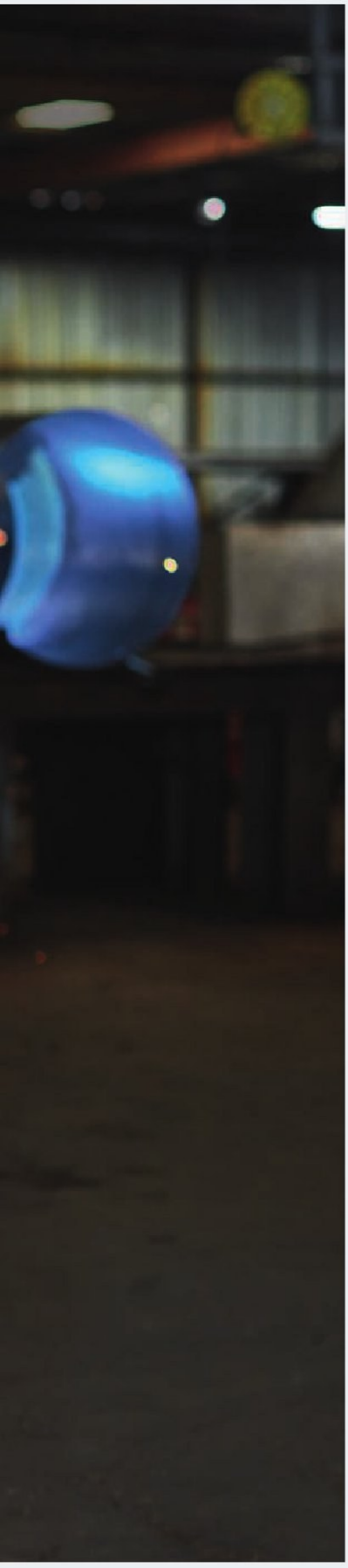


AVRIL 2024 - N° 926 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ÎLE MAURICE : 8,60€ / TOM AVION 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA 9,99 $ CA

L 13418 - 926 S - F: 5,30 € - RD

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 926 - AVRIL - VAINCRE L'INSOMNIE

- Shanna Ford
Soudeuse professionnelle



Meta

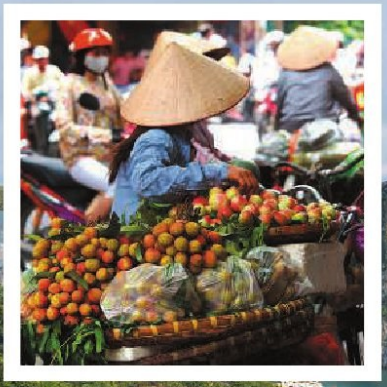
« Avec la réalité virtuelle, je peux m'entraîner à souder et développer ma mémoire musculaire, chez moi. »

S'entraîner avec la plateforme **ForgeFX** a contribué à améliorer la vie de Shanna Ford en lui permettant d'exercer un métier qu'elle aime et de mener une vie de famille stable.

Le métavers a déjà un impact.

EN SAVOIR PLUS
META.COM/METAVERSEIMPACT/FR

Plongez au cœur des lieux incontournables de la péninsule indochinoise



Scannez ce QR code pour télécharger la brochure

Croisière : Les perles de l'Asie du Sud-Est

Voyages d'exception

Vivez un périple initiatique, **fascinant et dépaysant** à bord du Celebrity Solstice, vers les villes fascinantes de l'**Asie du Sud-Est**, comme **Singapour, Bangkok, Hô Chi Minh-Ville, ou Hong Kong**... en compagnie de **Barthelemy Courmont**, auteur, et **Pascal Bruckner**, écrivain.

JANVIER 2025

Dès **5 590 €**/pers.*

depuis Paris - pension complète

CROISIÈRES FRANCOPHONES

ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS

CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

Réservations et informations

Demandez notre brochure détaillée au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@voyages-exception.fr**, sur **voyages-exception.fr/brochures** (code SCASI à renseigner), ou contactez votre agence de voyages.

CGV disponibles sur notre site. Photos : ©AdobeStock ©Holland America

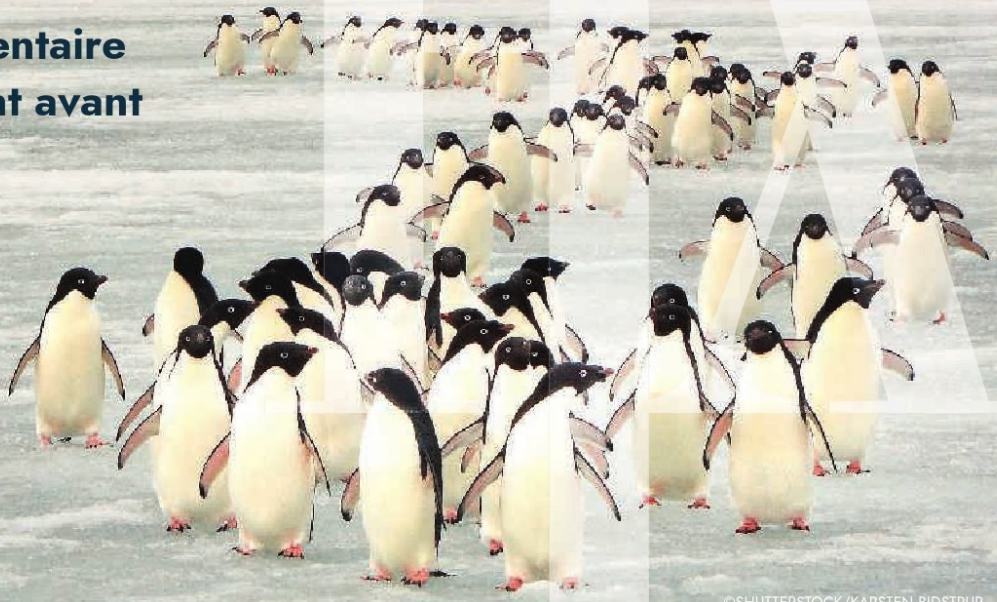
VOYAGES-EXCEPTION.FR

*Prix incluant une remise de 400€/pers. pour toute réservation avant le 30 avril 2024. Plus de détails sur le voyage en consultant notre site web.

Et si la foule faisait partie du charme?

Et si vos vols étaient offerts?

Réduction supplémentaire de 10% en réservant avant le 31 mars



©SHUTTERSTOCK/KARSTEN BIDSTRUP

Croisières en Antarctique avec vols offerts

ÉCONOMISEZ JUSQU'À
5590€ PAR CABINE

Depuis 1896, nous sommes les pionniers de l'exploration. Réservez votre croisière d'expédition avant le 31 mars et nous vous offrons les vols internationaux sur une sélection de départs. Vivez une expérience unique à bord de navires confortables et parfaitement adaptés à nos destinations d'exception.

Tél: 01 86 26 04 19

hxexpeditions.com/fr ou dans votre agence de voyages

Offre soumise à conditions, non rétroactive, valable pour toute nouvelle réservation simultanée d'une croisière d'expédition et d'un forfait acheminement aérien du 28.12.23 au 31.03.24. La réduction « Vols offerts » s'applique sur le prix du forfait acheminement aérien vendu séparément de la croisière et uniquement sur les vols en classe économique au départ de Paris (en fonction des disponibilités). Ne s'applique pas sur les vols inclus dans l'itinéraire de la croisière. Cette offre est valable sur une sélection de départs et un nombre limité de cabines. Le prix de la croisière reste modulable et évolutif en fonction du remplissage du navire comme indiqué dans les conditions particulières de ventes. Non combinable avec les autres offres en cours (Réservation anticipée, tarif Groupes ou autre tarif spécifique) sauf la remise 1893 Ambassador. Hurtigruten France SAS au capital de 40 000 € - R.C.S Paris B 449 035 005 - IM 075100037 - APST RCAPST HISCOX/125 520.

En savoir plus

UNE SOCIÉTÉ HURTIGRUTEN GROUP

BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

S'éduquer au climat

Trois mois après la COP28 à Dubai, se considèrent-ils comme suffisamment éclairés ? Le fait est que leur absence fut flagrante lors des deux journées intitulées « L'urgence climatique. Un tournant décisif ? », qui ont réuni en mars à l'Académie des sciences 30 scientifiques du plus haut niveau, sous la houlette d'un comité présidé par le paléoclimatologue Jean Jouzel. On n'aura en effet croisé aucun député, sénateur ou ministre en exercice venu s'instruire avec la prix Nobel Esther Duflo, les académiciens (technologies, sciences, agriculture) Valérie Masson-Delmotte, Cédric Villani, Marion Guillou, Agnès Ducharne ainsi que toutes et tous les autres spécialistes du CNRS, BRGM, Sorbonne, Sciences Po…

Marges d'incertitude. Le terme d'« urgence » et le point d'interrogation du titre du colloque avaient pourtant de quoi retenir l'attention. En s'appuyant sur les travaux les plus récents, interrogeaient ainsi les académiciens dans leur invitation envoyée tous azimuts : *« Sommes-nous à un tournant par rapport à l'urgence d'agir, de réduire rapidement nos émissions de gaz à effet de serre et de nous adapter ? »* Formulation empreinte de prudence, car les scientifiques raisonnent toujours avec des marges d'incertitude. Sauf qu'à les écouter en direct, on entend l'alerte.

100 % responsables. À l'heure où 37 % des Français se disent climatosceptiques, il faut rappeler l'indiscutable réalité du changement climatique. *« Le climat est déjà différent de celui d'il y a dix ans »*, indique le météorologue et climatologue Robert Vautard, aujourd'hui coprésident du groupe 1 du Giec — à retrouver dans le prochain hors-série « Les Indispensables » de *Sciences et Avenir*, consacré à la thématique « Météo et climat ». Et *« nous sommes à 100 % responsables du réchauffement global sur la dernière décennie »*, souligne Christophe Cassou (CNRS), qui tient chronique dans le mensuel *(lire p. 94)*.

Fonte du pergélisol. À preuve, les effets sont désormais scientifiquement mesurables sur les forêts, les zones côtières, le cycle de l'eau, les rendements agricoles… Et ressentis par tout un chacun lors d'événements extrêmes (tempêtes, canicules…). Les incertitudes ? On retiendra la fonte du pergélisol dont le dégazage pourrait provoquer une amplification jusqu'à 20 % du réchauffement global. Problème, avec la guerre menée par la Russie en Ukraine, tout se complique pour réunir de cruciales données d'observation en Sibérie et dans l'Arctique russe, la collaboration avec les spécialistes de ces zones étant interrompue.

Éco-anxiété. Deux chiffres frappants ? Seulement 2 % des enseignants traitent du changement climatique et trois quarts des adolescents souffrent d'éco-anxiété. Comment y remédier ? Une éducation scientifique plus poussée et le souhait que les plus jeunes deviennent acteurs du changement avec la mise en œuvre de projets (atténuation, adaptation) leur donnant confiance en eux. Outre travailler en classe sur… les émotions. De quoi interpeller, *a minima*, la ministre de l'Éducation. ■

COURRIER

« La vérité sur les effets secondaires des vaccins anti-Covid »
(Sciences et Avenir-La Recherche, n° 924, février 2024)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Félicitations pour la qualité de votre revue qui m'étonne chaque mois depuis des années par la variété des sujets abordés et l'intérêt qu'ils suscitent. Merci pour la vision que vous avez apportée sur les effets secondaires des vaccins anti-Covid. Comme d'habitude, vous avez mené une enquête sérieuse passant en revue les effets connus par l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM). Je dois tout de même ajouter que tous les signalements de problèmes ne sont pas remontés jusqu'à l'ANSM. Soit pour des raisons liées au territoire (manque de médecins), soit par manque de volonté de certains médecins. Le système de pharmacovigilance en France n'est peut-être pas parfait, pour plein de raisons, mais il a l'avantage d'exister. **Brigitte Arnould**

S. et A. : Merci pour votre enthousiasme ! Et de rappeler qu'en effet, la pharmacovigilance, quel que soit le produit de santé concerné, est une démarche toujours imparfaite, en raison de la complexité des données à traiter, et sans fin, puisqu'elle constitue un système de surveillance au long cours.

Poivre d'ailleurs

Votre magazine n° 922 que je viens de lire était absolument passionnant comme souvent. Toutefois, je voulais réagir à l'article « Poivre et piment, chaud devant ! ». Si le poivre est peut-être une bonne source d'antioxydants, ne faut-il pas nuancer cette affirmation avec le fait que c'est un aliment qui provient de pays lointains dont la composition réelle et l'exposition aux produits chimiques sont plus qu'incertaines : présence de poivre épuisé (résidus de la graine après extraction de son huile essentielle entre autres) dans le poivre moulu, utilisation d'engrais chimiques sur les plants. La même question de la balance bénéfice/risque pour l'alimentation pourrait se poser pour nombre de produits exotiques qui font le tour du monde avant d'arriver dans notre assiette.

Nicolas Blanc

S. et A. : Vous avez raison, il est préférable de consommer du poivre en grains et de le moudre soi-même. Il faut faire attention aux tromperies et être certain de la traçabilité du produit que l'on achète. Peut-être aurons-nous des cultures plus près de chez nous dans les années à venir. Dans le Cotentin, se trouve depuis 2022 la première exploitation poivrière normande (plantation Petite Rivière). Dans le Lot-et-Garonne, une exploitation (Les roulottes du bivouac d'Albret) cultive aussi des poivriers du Sichuan.

Précisions

MILLIWATTS Dans l'article sur le bilan carbone de l'industrie spatiale (*S. et A.* n° 924, p. 41), le forçage radiatif des lancements de fusées est évalué à 16 milliwatts (mW) — et non mégawatts (MW) — par m² ; celui de l'aviation est estimé à 100 milliwatts (et non mégawatts) par m².

FOURIER Dans l'article sur l'âge de notre planète (*S. et A.* n° 925, p. 88), nous avons attribué au philosophe utopiste Charles Fourier la paternité de travaux sur la propagation de la chaleur, alors qu'ils ont été réalisés par le mathématicien et physicien Joseph Fourier.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France / Ch. Abramowitz

En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR La Recherche

france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Fermer les yeux, rêver

Du jamais-vu depuis quarante ans : une nouvelle classe de somnifères vient enrichir l'arsenal thérapeutique pour prêter main-forte aux personnes souffrant d'insomnie chronique. Pour la première fois, le traitement ne consiste pas à stimuler le sommeil mais à empêcher l'éveil *(p. 56)*. Ce qui peut paraître une subtilité de langage implique en réalité une voie biologique totalement différente. Avec, à la clé, des molécules beaucoup moins addictives. Pourtant, bien loin de nous l'idée de laisser entendre qu'une « petite pilule » va résoudre les problèmes des personnes en souffrance. Au contraire : notre grande enquête révèle qu'aujourd'hui, ce sont les approches non médicamenteuses qui sont les plus efficaces sur le long terme. Il n'est pas question seulement d'une bonne hygiène de vie, certes indispensable *(p. 64)* ; il s'agit littéralement de réapprendre à dormir avec les thérapies comportementales et cognitives. Bien que connues depuis longtemps, leur prescription est une pratique très récente. Suivez-nous, nous en avons fait l'expérience… avec succès *(p. 61)* ! La preuve qu'être insomniaque, ce n'est pas pour la vie.

> « Notre grande enquête révèle qu'aujourd'hui ce sont les approches non médicamenteuses qui sont les plus efficaces sur le long terme contre l'insomnie chronique »

C'est ensuite à tête reposée que vous pourrez rêver des découvertes que nous vous proposons ce mois-ci : un réseau de villes conçu par une civilisation oubliée sous la forêt amazonienne — qui donc est tout sauf vierge —, une étoile prête à exploser et à briller comme l'étoile Polaire dans notre ciel les prochains jours, une approche inédite de modification génétique des plantes qui pourrait révolutionner l'agriculture, ou encore les dernières avancées des biologistes pour ralentir le vieillissement. Sans oublier vos nouveaux rendez-vous, le journal de l'IA et l'histoire des sciences, consacrée ce mois-ci à ce que Christopher Nolan ne vous a pas dit du très grand physicien que fut Robert Oppenheimer. Bonne lecture et bonnes nuits. ■

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANNOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, N. GUTIERREZ C., J.-F. HAÏT, Y. HERRERA, P. KALDY, M. LAPLACE, E. NICOLAS, M. PARRA, S. VIONNET
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Sarah BOULVARD (journaliste vidéaste en alternance) - 01.55.35.56.51, Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés », jetée sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ; ainsi que les messages « Parrainage Sciences et Avenir » et « L'Homme Moderne » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Ça change

tout

19,99 €[(1)] /mois

C'est le prix de la Série Spéciale 120 Go 5G sans engagement, et il n'est pas près de changer.

PARIS 2024 | PARIS 2024

FOURNISSEUR OFFICIEL

Offre soumise à conditions, valable à partir du 01/02/24 en France métropolitaine. 10 € de frais d'activation de la carte SIM.
5G : dans les zones couvertes (déploiement en cours) avec terminal compatible. Couverture sur reseaux.orange.fr. **(1)** Réservé aux particuliers dans la limite de 5 forfaits mobile par offre internet Orange. Tarif incluant une remise de 5 € sur le tarif du forfait Série Spéciale 120 Go 5G à 24,99 €/mois. Perte de la remise en cas de résiliation de l'offre internet ou de demande de suppression de la remise par le client internet.

orange™ est là

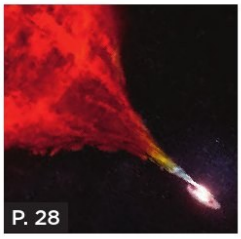
SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 926 / Avril 2024

DOSSIER P. 52

Comment vaincre l'insomnie

Les problèmes de sommeil perturbent la vie de millions de Français. Mais les recherches ont nettement progressé : nouveau type de somnifère, thérapies comportementales et cognitives... « Sciences et Avenir » fait le point sur ce qui marche... ou pas.



P. 28

Nova : une étoile va illuminer le ciel d'avril

Une « nouvelle » étoile devrait être très bientôt visible à l'œil nu dans la constellation de la Couronne boréale. Un phénomène de nova qui se reproduit tous les 80 ans. Explications.

P. 38

Nouveaux OGM, la révolution verte

L'assouplissement de la réglementation européenne ouvre la possibilité de créer de nouvelles variétés de plantes plus résistantes. Mais ces techniques génomiques divisent les scientifiques.

P. 78

Amazonie : la civilisation oubliée de l'Upano

Le plus vaste réseau urbain de la région amazonienne a été mis au jour au sud de l'Équateur grâce à la technologie du lidar. Vestige exceptionnel d'une civilisation sans écriture.

7 **Éditorial** par Dominique Leglu
8 **Courrier**
9 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

12 **ACTUALITÉS** Les étoiles massives façonnent les systèmes planétaires / Découverte d'un nouveau type de magnétisme
28 **Nova : une étoile va illuminer le ciel d'avril**
33 **Un robot fait de cellules humaines**
36 **Journal de l'IA : Des algorithmes s'attaquent aux odeurs**

NATURE

16 **ACTUALITÉS** Les tortues marines se portent mieux /Des montagnes sous-marines au large du Chili
38 **Nouveaux OGM, la révolution verte**
43 **Quand l'humain érode les montagnes**
46 **Entretien avec l'historienne des sciences Valérie Chansigaud**

SANTÉ

20 **ACTUALITÉS** Une différence cérébrale entre les deux sexes / Une madeleine de Proust au secours des dépressifs
68 **Objectif : vivre 120 ans en bonne santé**
73 **L'étonnante adaptation du corps à l'altitude**
76 **Nutrition : La moutarde, une graine qui a du piquant**

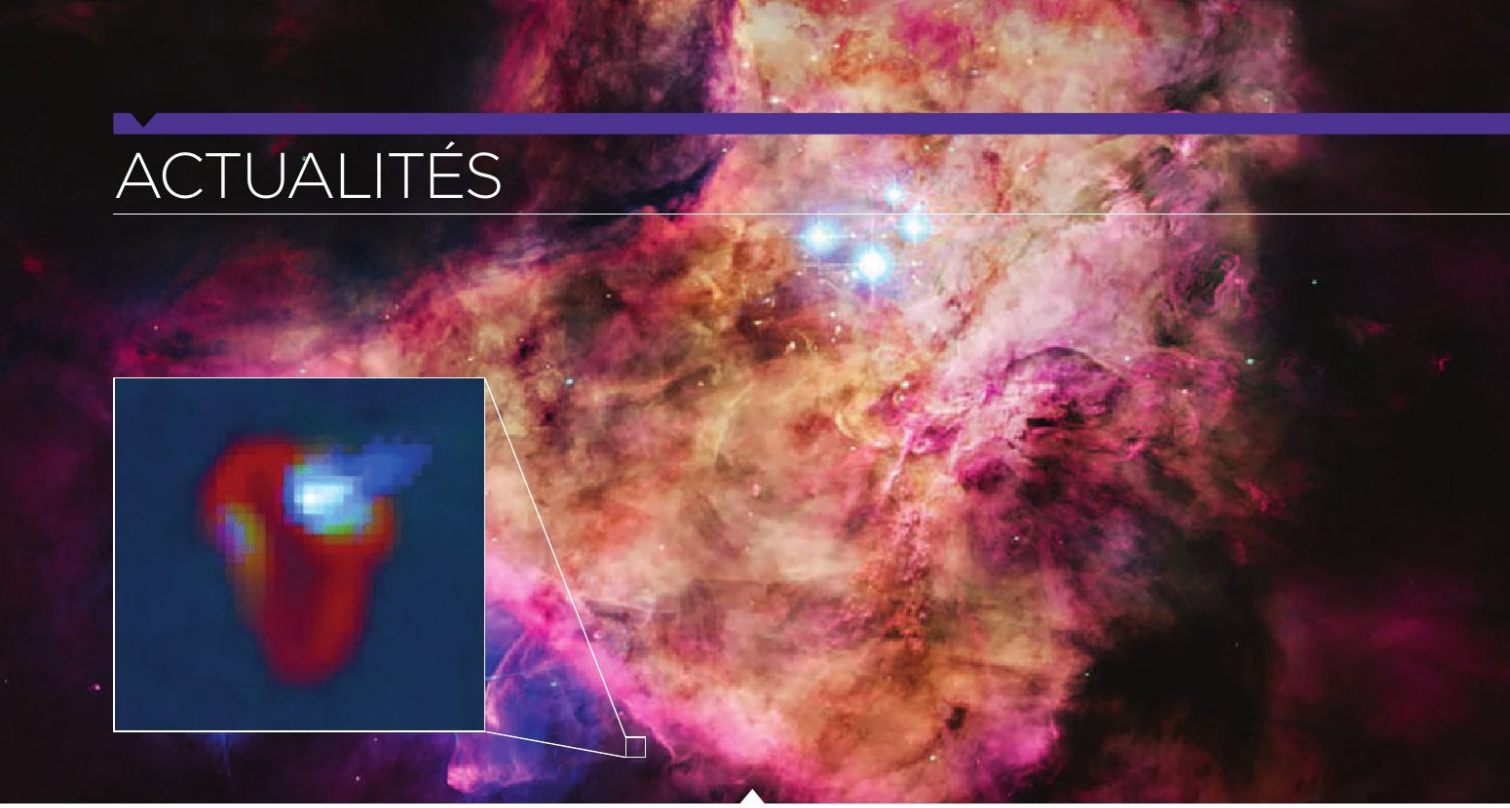
HISTOIRE

24 **ACTUALITÉS** Un zoo fossile d'un demi-milliard d'années / Le plus vieux rouge à lèvres connu a 4000 ans
78 **Amazonie, la civilisation oubliée de l'Upano**
83 **Des espèces disparues renaissent grâce aux robots**
86 **Histoire des sciences : Oppenheimer, le physicien éclipsé par la bombe**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**
93 **Expositions**
94 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar
96 **Questions de lecteurs**
97 **Le ciel d'avril**
98 **Jeux**

JANIECBROS/GETTY IMAGES - SUPERBOSSA.COM/MPP - GUILLAUME BONNEFONT/IP3/MAXPPP - STÉPHEN ROSTAIN



Dans la nébuleuse d'Orion, les étoiles du Trapèze (en haut) provoquent l'évaporation d'un protosystème planétaire (médaillon) situé à 0,8 année-lumière.

NASA, ESA, HUBBLE, ROBERT GENDLER

Les étoiles massives façonnent les systèmes planétaires

Des astronomes sont parvenus pour la première fois à mesurer l'impact des étoiles très brillantes sur les systèmes planétaires en formation aux alentours.

Comment se forment les systèmes planétaires au cœur des pouponnières d'étoiles ? Longtemps, la réponse n'a semblé dépendre que de la masse de l'étoile centrale et du disque de poussières qui l'entoure. Mais des observations du télescope spatial James-Webb et du réseau de radiotélescopes Alma (Chili) montrent qu'il faut aussi prendre en compte l'influence des étoiles massives qui peuplent les parages du système planétaire en formation. *« Ces étoiles sont environ 10 fois plus massives que notre Soleil, et 100 000 fois plus lumineuses,* explique Olivier Berné, de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse, premier auteur de l'étude parue dans la revue *Science. Elles émettent un fort rayonnement dans l'ultraviolet lointain qui chauffe le disque protoplanétaire situé à proximité. Le gaz du disque échappe alors à l'attraction gravitationnelle de son étoile centrale et le disque s'évapore très vite, ce qui peut empêcher la formation de planètes. »*

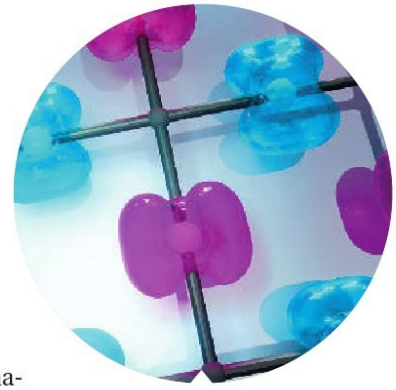
Un phénomène de photo-évaporation

Ce mécanisme, la photo-évaporation, était déjà soupçonné, comme nous l'indiquions dans le dossier consacré aux premiers résultats du James-Webb *(lire* S. et A. *n° 916)*, mais il n'avait encore jamais été mesuré. C'est chose faite sur le protosystème planétaire d203-506 situé dans la nébuleuse d'Orion, la pouponnière d'étoiles la plus proche de nous à 1350 années-lumière. La masse de l'étoile de ce système solaire en train de naître est inférieure à 0,3 fois celle du Soleil. Et le gaz qui l'entoure est chauffé à environ 1000 °C par les étoiles environnantes. Les astronomes ont ainsi mesuré le taux d'évaporation du disque : il perd l'équivalent de la masse de la Terre chaque année ! Il aura ainsi totalement disparu dans 130 000 ans environ. L'influence des étoiles massives à distance est donc telle qu'aucune planète ne pourrait avoir le temps de se former.

Cette étude est d'autant plus cruciale que les étoiles sont rarement des « filles uniques ». *« Dans la majorité des cas, elles naissent en amas dans lesquels il y a souvent une ou plusieurs étoiles massives qui vont influencer le destin des étoiles plus petites,* complète Olivier Berné. *Notre système solaire a d'ailleurs subi cette influence durant au moins son premier million d'années. »* L'équipe va désormais mesurer cet effet sur d'autres systèmes en formation dans Orion, afin de confirmer et de mieux décrire l'action des étoiles massives autour d'elles. ■ **F. N.**

Découverte d'un nouveau type de magnétisme

L'altermagnétisme s'ajoute aux deux catégories connues : le ferromagnétisme et l'antiferromagnétisme.



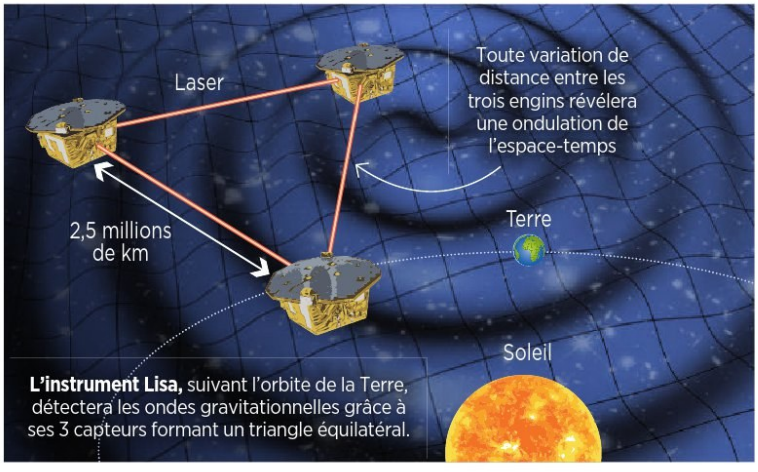
Spins représentés schématiquement dans un matériau altermagnétique.

L. ŠMEJKAL & A. BIRK HELLENES

Prédite depuis 2019, l'existence d'un nouveau type de magnétisme vient d'être confirmée par des mesures expérimentales à l'institut Paul-Scherrer (Suisse). Cet « altermagnétisme » s'ajoute aux deux catégories connues : le ferromagnétisme et l'antiferromagnétisme. Tous résultent d'une grandeur purement quantique associée aux électrons constitutifs des atomes : le spin, sorte de minuscule aimant pouvant pointer dans deux directions. Dans les matériaux ferromagnétiques comme le fer ou le cobalt, les spins s'alignent tous de la même façon, produisant des aimants permanents. Dans les matériaux antiferromagnétiques tel le chrome, ils sont orientés dans des directions antiparallèles et s'annihilent donc. La nouvelle famille présente une combinaison spécifique de la disposition des spins et des symétries cristallines : un atome sur deux pivote de 90° et son spin de 180°. Plus de 200 composés auraient une telle architecture, qui pourrait se révéler très utile pour stocker des informations. **F. D.**

EN DEUX MOTS

ROBOTIQUE Pour la première fois, un petit robot chirurgical envoyé sur la Station spatiale internationale a pu être manipulé depuis la Terre pour simuler une opération chirurgicale. **BRAILLE** Des chercheurs ont développé un capteur robotique intégrant des techniques d'intelligence artificielle pour lire le braille deux fois plus vite que la plupart des humains. **PHYSIQUE** Si exotiques pour les Terriens, les pluies de diamants pourraient se produire sur plus de 1900 des 5603 exoplanètes officiellement recensées à ce jour.



L'instrument Lisa, suivant l'orbite de la Terre, détectera les ondes gravitationnelles grâce à ses 3 capteurs formant un triangle équilatéral.

BRUNO BOURGEOIS

Un observatoire spatial des ondes gravitationnelles

ASTROPHYSIQUE L'Agence spatiale européenne a donné son feu vert à la mission Lisa (Laser Interferometer Space Antenna), première initiative visant à détecter des ondes gravitationnelles directement dans l'espace. Trois engins spatiaux suivront la Terre sur son orbite autour du Soleil, formant un triangle équilatéral précis de 2,5 millions de kilomètres de côté, mesuré grâce à des faisceaux laser. Toute variation de distance entre les trois capteurs indiquera une ondulation de l'espace-temps provoquée par la collision de trous noirs. Lancement prévu en… 2037. **H. J.**

121,6 grammes

La masse astéroïdale collectée par Osiris-Rex

NASA

ESPACE La Nasa a enfin révélé la quantité d'échantillons prélevés sur l'astéroïde Bénou par la mission Osiris-Rex. C'est plus du double de l'objectif initial (50 g), mais bien moins que les 250 g espérés par la Nasa depuis le retour sur Terre de la capsule en septembre 2023. **J. I.**

Matriochkas stellaires : une étoile peut en cacher une autre

ASTROPHYSIQUE Une équipe a décrit l'existence théorique d'étoiles emboîtées les unes dans les autres à la façon de poupées russes. Ces gravastars seraient des astres aussi massifs que des trous noirs, mais composés principalement de vide, avec une coquille de matière très dure maintenue grâce à l'énergie noire. **S. V.**

SOURCE : DANIEL JAMPOLSKI, UNIVERSITÉ GOETHE DE FRANCFORT, ALLEMAGNE.

Le plus grand quasi-cristal du monde

PHYSIQUE Les quasi-cristaux, structures ordonnées mais non périodiques, n'avaient été observés jusqu'ici qu'à de très petites échelles. Mais des physiciens ont fabriqué un quasi-cristal 1000 fois plus gros ! Ils ont utilisé des billes d'acier de 1,2 et 2,4 mm qu'ils ont fait vibrer à une fréquence particulière. Après 170 heures, un quasi-cristal est apparu, arborant des formes géométriques qui ne se répètent pas. **F. D.**

SOURCE : ANDRÉA PLATI, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE.

GE-CHENG ZHA

« Maggie » volant au-dessus de la planète Rouge (vue d'artiste).

Un projet d'avion martien à énergie solaire

INGÉNIERIE La Nasa a lancé des études de faisabilité pour un avion martien à énergie solaire. Appelé « Maggie » (Mars Aerial and Ground Global Intelligent Explorer), l'engin serait entièrement automatisé et recouvert de cellules photovoltaïques. Objectif : réaliser des vols de 200 km à une vitesse de 300 km/h et jusqu'à 1000 m d'altitude. De quoi parcourir, en théorie, une distance totale de 16 000 km lors d'une année martienne (687 jours terrestres) et révolutionner ainsi l'exploration de la planète Rouge. **F. D.**

Premier alunissage d'une sonde privée

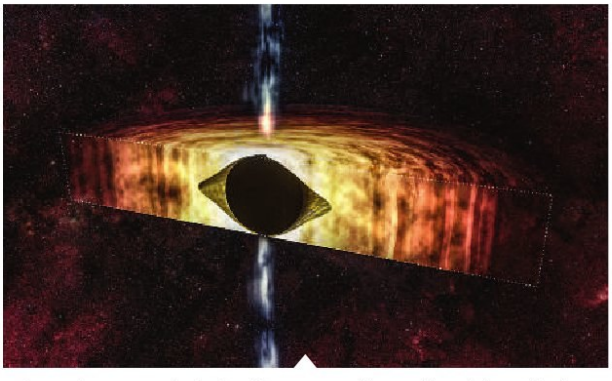
ESPACE L'américain Intuitive Machines est devenu le 22 février la première société privée à poser un appareil sur la Lune. Sa sonde Odysseus signe aussi le premier retour américain sur le sol sélène depuis la fin du programme Apollo, il y a plus de 50 ans. Un demi-succès toutefois, puisque la sonde de 4 m de haut s'est renversée au moment d'alunir. Elle a cependant pu transmettre des données scientifiques sur le pôle sud de la Lune, où la Nasa prévoit d'envoyer ses astronautes dans le cadre du programme Artemis. **H. J.**

NASA

Odysseus s'est posée sur le pôle sud de la Lune le 22 février.

Le trou noir de la Voie lactée pourrait entrer en éruption

Sa vitesse de rotation indique qu'il dispose de l'énergie nécessaire pour « s'illuminer ».



CXC/MELISSA WEISS

Coupe transversale de SgrA*, avec son disque d'accrétion et les jets d'énergie de part et d'autre (simulation).

Le trou noir supermassif SgrA*, 4,3 millions de masses solaires nichées au cœur de la Voie lactée, est au bord de la crise de nerfs. C'est ce que suggère une étude dirigée par Ruth Daly à l'université d'État de Pennsylvanie (États-Unis). Avec son équipe, l'astrophysicienne a étudié la rotation du trou noir sur lui-même à partir du comportement de la matière formant son disque d'accrétion. Les chercheurs ont pour cela utilisé le rayonnement X de SgrA*, collecté par le télescope spatial Chandra, et le rayonnement radio grâce au Very Large Array (VLA), au Nouveau-Mexique. Leurs observations révèlent que le trou noir tourne très vite sur lui-même, à 60 % de la vitesse maximale autorisée par les lois de la physique. Or, cette vitesse constitue une réserve d'énergie considérable si un nuage de gaz ou une étoile venait à s'égarer à proximité… SgrA* transformerait alors cette matière en puissants jets d'énergie. Jusqu'ici endormi, il se mettrait à briller tel un phare de rayons X dans la galaxie. **F. N.**

IL A DIT

« Si nous équipions nos robots humanoïdes d'une IA pour leur faire faire un travail que les humains ne veulent pas faire, nous pourrions en vendre des millions, voire des milliards »

Brett Adcock, P-DG de la start-up américaine Figure AI, traçant la perspective de la collaboration qu'il vient de signer avec OpenAI (ChatGPT) pour équiper ses robots d'une intelligence artificielle efficace.

eDF

Devenons l'énergie qui change tout.

ENVOLEZ-VOUS POUR UNE GALAXIE TRÈS LOINTAINE

©Disney © & TM 2024 Lucasfilm Ltd.

TOUT EN FAISANT DES ÉCONOMIES.

Installer une borne de recharge pour véhicule électrique, c'est faire un plein 3 à 4 fois moins cher* qu'avec un carburant thermique.

RCS PARIS 552 081 317.

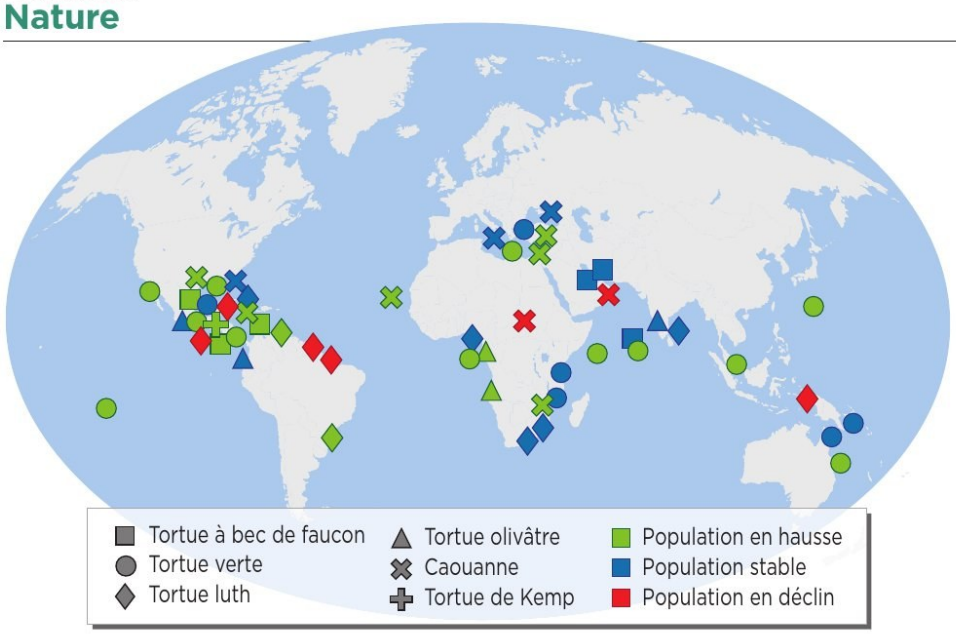
Disneyland PARIS | eDF

Partenaire officiel

edf.fr/solutionshabitat

*Source R&D, EDF, mai 2023. Hors coût d'installation d'une borne. Sur la base de consommation moyenne d'une voiture citadine à essence (6 L/100 km), d'un prix de l'essence à 1,9 €/L et d'un prix de l'électricité en heures creuses de 0,1615 €/kWh.

L'énergie est notre avenir, économisons-la !



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : GRAEME C. HAYS ET AL., ISCIENCE 2024

Les tortues marines se portent mieux

Les efforts de protection menés depuis des années montrent une hausse des pontes pour la plupart des espèces dans le monde.

Le nombre de nids de ponte des tortues marines est stable voire en augmentation pour la plupart des espèces dans le monde, selon le bilan d'une équipe internationale, confirmant un précédent recensement datant de 2017. *« C'est une bonne nouvelle ! Ces bons résultats sont à mettre au compte des efforts de protection menés depuis des années par certains pays et les ONG »*, se réjouit Alexandre Gérard, chef de projet sur les tortues marines PatriNat au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Parmi les six espèces suivies sur les sept existantes, des progressions spectaculaires sont observées, comme celle des tortues caouannes au Cap-Vert, des tortues de Kemp au Mexique ou des tortues vertes aux Seychelles et aux îles Cayman. *« Le réchauffement des eaux a pu aussi intervenir, par exemple dans l'ouest de la Méditerranée, où l'an passé a été exceptionnel en France et en Italie en matière de ponte sur les plages pour les tortues caouannes »*, note le chercheur.

De nouveaux sites de ponte découverts

Mieux, de nouveaux sites importants de ponte sont encore découverts, tel celui des tortues vertes dans des récifs coralliens à l'ouest de la Nouvelle-Calédonie. Seule la tortue luth, la plus grosse espèce, semble décliner dans certaines régions, et même avoir disparu en Malaisie. *« Dans toute la France d'outre-mer, les effectifs de tortue luth sont aussi en forte baisse sans que l'on sache pourquoi, même si c'est l'espèce qui, naviguant le plus, est aussi la plus exposée »*, précise Alexandre Gérard.

Pour les auteurs de l'étude publiée dans la revue *iScience*, ces données sont néanmoins encourageantes, bien que les observations aient pu être biaisées en ne portant que sur des sites déjà protégés. *« De toute façon, il ne faut pas relâcher nos efforts quand on voit toutes les menaces auxquelles sont confrontés ces reptiles (pollutions, pêche, collisions) et que, faute de financement local, on ne connaît toujours pas l'évolution de leurs effectifs dans certaines parties du monde »*, conclut Alexandre Gérard. ■ **P. K.**

ELLE A DIT

« Il y a ici des espèces dont le son est impressionnant, littéralement comme dans "Star Wars", on dirait des vaisseaux spatiaux »

Andrea Bonilla, biologiste de l'université Cornell (États-Unis), lors d'une campagne d'immersion d'hydrophones à 500 m de profondeur. La captation sonore sur un an permettra d'étudier les mammifères de l'océan Austral.

Le bernard-l'hermite s'abrite… dans nos déchets

ÉTHOLOGIE Une étude a évalué l'utilisation de déchets par des bernard-l'hermite terrestres pour s'abriter. À la place des coquilles vides de gastéropodes, 85 % des spécimens élisaient domicile dans des bouchons en plastique, plus rarement dans des déchets en métal ou en verre. L'abondance d'ordures, le manque de coquilles disponibles et la sélection sexuelle pourraient expliquer ce changement comportemental. **A.-S. T.**

SOURCE : ZUZANNA JAGIELLO, UNIVERSITÉ DE VARSOVIE, POLOGNE.

Z. JAGIELLO

« Coenobita purpureus » dans un bouchon en plastique.

Cartographier les terres agricoles

En combinant vues satellitaires et images au sol de Google Street View, des chercheurs parviennent à automatiser la reconnaissance des cultures.

Régions trop reculées, trop pauvres, maillage morcelé de petites fermes… Dans certains pays, recueillir des déclarations d'exploitants agricoles sur leurs cultures est un casse-tête logistique. D'où l'idée d'une équipe du Massachusetts Institute of Technology (États-Unis) d'automatiser la cartographie des couverts agricoles en combinant vues satellitaires et images de Google Street View prises depuis une voiture dans un système d'apprentissage automatique. En Thaïlande, sur des images allant de mai à octobre 2022, les chercheurs ont d'abord appris à un algorithme à reconnaître si une photo montrait un champ ou non. Puis, avec un autre algorithme, à étiqueter les images selon cinq catégories de plantation : riz, manioc, maïs, canne à sucre et « autre ». Enfin, chaque image était associée aux vues satellite correspondantes, en fonction de la teinte de vert ou la réflexion de la lumière. Bilan ? La technologie identifie correctement une culture dans 93 % des cas. Mais la méthode implique qu'un pays ait été couvert par Google Street View. **A. D.**

MIT, GOOGLE STREET VIEW

Un algorithme identifie les différents types de culture (de gauche à droite : maïs, riz, manioc et canne à sucre).

A. MUSTARD/NATUREPL/EBPHOTO

« B. musculus » possède de l'ADN de rorqual commun.

Les baleines bleues s'accouplent avec des rorquals communs

ZOOLOGIE L'étude du génome de 26 baleines bleues a mis au jour une forte présence d'ADN de rorqual commun, indiquant des accouplements fréquents entre les deux espèces, mais aussi avec les hybrides naissant de ces unions. Semblables à des rorquals, ces derniers héritent de la grande taille des baleines et de leur mâchoire en forme de « u ». **E. N.**

SOURCE : SUSHMA JOSSEY, MUSÉE ROYAL DE L'ONTARIO, CANADA.

EN DEUX MOTS

RÉCHAUFFEMENT La Grande Barrière de corail d'Australie subit un épisode de « blanchissement massif », a annoncé le ministère de l'Environnement australien. **BIOCONTRÔLE** En réduisant les populations de nuisibles, les prédateurs naturels — oiseaux, coléoptères, araignées — sont une alternative efficace à certains pesticides dans les champs, montre une vaste étude. **ORNITHOLOGIE** Face à une population croissante de kiwis, la Nouvelle-Zélande a ouvert son premier hôpital dédié à ce petit oiseau, emblème du pays.

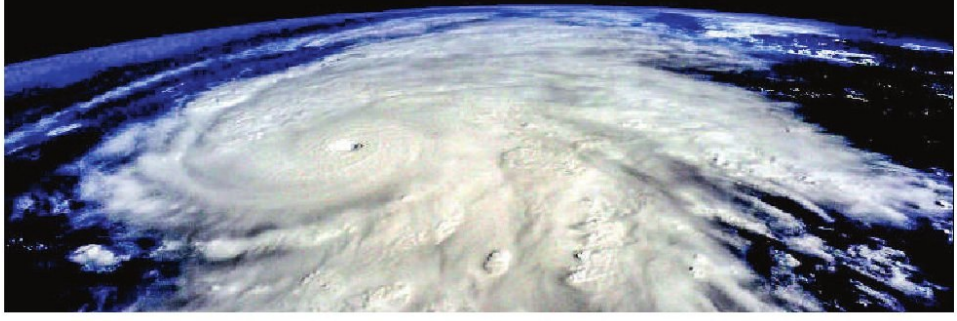
14 Le nombre de nouvelles espèces migratrices protégées

BIODIVERSITÉ Parmi ces animaux retenus par les 133 États membres lors de la COP14 sur les espèces migratrices, figurent le lynx eurasiatique, le chat de Pallas, le requin-taureau, le grand dauphin de Lahille, le pélican thage ou encore trois raies de Méditerranée… Un accord entre 30 pays a par ailleurs été signé pour coordonner l'action de préservation des espèces d'oiseaux migrants entre la Sibérie et les pays riverains de l'océan Indien et du Sud-Est asiatique. **L. C.**

Des ouragans de catégorie 6

MÉTÉOROLOGIE Utilisée depuis les années 1970 pour classifier l'intensité des ouragans (de 1 à 5), l'échelle de Saffir-Simpson devrait se voir ajouter une 6e catégorie, selon une étude. Le réchauffement climatique augmente en effet l'énergie thermique disponible, accroissant l'intensité potentielle des vents. Sur ces dix dernières années, cinq ouragans, dont Patricia en 2015 au Mexique, auraient pu être mis dans cette catégorie comprenant des vents supérieurs à 309 km/h. **A.-S. T.**

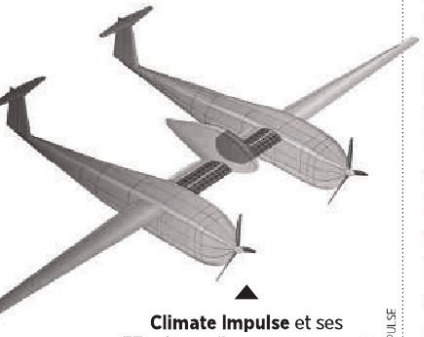
SOURCE : MICHAEL WEHNER, LABORATOIRE NATIONAL LAWRENCE-BERKELEY, ÉTATS-UNIS.



SIPA

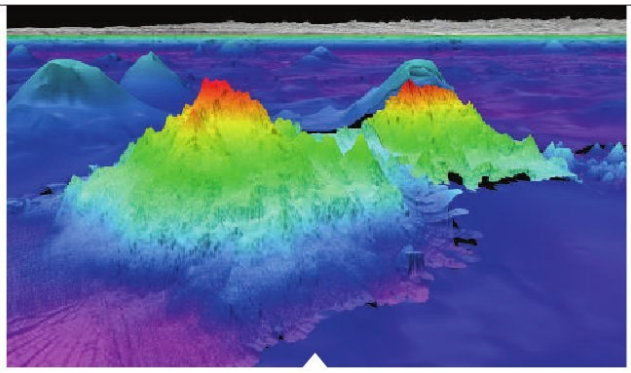
Un nouvel avion vert pour Bertrand Piccard

ÉNERGIE Après le premier tour du monde en avion solaire à bord du Solar Impulse entre 2015 et 2016, l'explorateur suisse Bertrand Piccard a dévoilé un nouveau projet d'aéronef à zéro émission de CO_2. Baptisé Climate Impulse, cet avion développé avec l'aide d'Airbus et d'ArianeGroup fonctionnera à l'hydrogène vert. Les premiers vols tests sont prévus en 2026. Et en 2028, le pilote prévoit de réaliser le tour du monde en huit jours sans escale. **H. J.**



CLIMATE IMPULSE

Climate Impulse et ses 37 mètres d'envergure seront propulsés par hydrogène (maquette).



SCHMIDT OCEAN INSTITUTE

Le plus grand des quatre monts s'étend sur une surface de 450 km². En tout, plus de 100 espèces inconnues ont été recensées sur leurs parois.

Des montagnes sous-marines au large du Chili

Découverts récemment, ces points chauds de la biodiversité culminent entre 1591 et 2681 mètres.

Embarquée à bord du navire de recherche *Falkor* du Schmidt Ocean Institute à Palo Alto (États-Unis), une équipe internationale de chercheurs a identifié dans les eaux chiliennes quatre monts sous-marins jusque-là inconnus et dont la taille varie de 1591 à 2681 mètres. Une découverte réalisée lors d'un trajet entre le Costa Rica et le Chili pour cartographier les fonds marins, dont les monts sont généralement des points chauds de biodiversité, encore mal connus. Au cours de leur mission, les scientifiques ont ainsi couvert 52 777 km² et ont collecté des données sur ces formations grâce à un robot. Ils ont ainsi observé des récifs de coraux d'eau froide, de vastes jardins d'éponges et, surtout, plus de 100 espèces jamais enregistrées auparavant. Selon les chercheurs, chaque mont sous-marin visité abrite des écosystèmes distincts, pour certains vulnérables. **S. R.**

Les ports sont des foyers cancéreux pour les moules

ZOOLOGIE Les ports maritimes accélèrent la dispersion d'un cancer rare mais transmissible chez les moules partout sur la planète. La maladie se propage par les cellules cancéreuses circulant entre mollusques. Mais la contagion est accélérée par le déplacement des bivalves malades fixés aux coques des bateaux. Les chercheurs plaident pour que ces carènes soient mieux nettoyées. **L. C.**

SOURCE : MAURINE HAMMEL, CNRS, FRANCE.

Pollution de l'air : l'Union européenne durcit le ton

ÉCOLOGIE Les normes sur la qualité de l'air auxquelles devront répondre les États membres de l'Union européenne d'ici à 2030 ont été durcies. Pour les oxydes d'azote (NOx) et les particules fines de moins de 2,5 micromètres de diamètre (PM2,5), les seuils sont abaissés de moitié, sans pour autant atteindre les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé. **L. C.**

Chez les grands singes aussi, les jeunes sont taquins

ÉTHOLOGIE Comme les enfants, les jeunes bonobos, orangs-outans, gorilles et chimpanzés sont adeptes de la taquinerie ludique. Gêner l'activité de l'autre ou faire mine de lui offrir un objet pour finalement le lui retirer… La taquinerie leur permet d'obtenir l'attention d'un congénère. La présence de ce comportement chez ces quatre espèces *« suggère que les taquineries ludiques et leurs prérequis cognitifs étaient présents chez notre dernier ancêtre commun »*, souligne une étude. **A.-S. T.**

SOURCE : I. LAUMER, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À LOS ANGELES, ÉTATS-UNIS.

ANUP SHAH/NATUREPL/EBPHOTO

Ce jeune chimpanzé attire l'attention d'un adulte en adoptant une attitude taquine.

EN PARTENARIAT AVEC musée des arts et métiers le cnam ! & SCIENCES AVENIR La Recherche

Festival Sciences pour Tous

13 & 14 AVRIL 2024
10H - 18H

Festival du Livre de Paris

Conférences, dédicaces et animations : le musée des Arts et Métiers accueille le **Festival Sciences pour Tous**. Une occasion de découvrir les sciences dans une atmosphère unique.

GRATUIT POUR TOUS SUR RÉSERVATION

UNE MANIFESTATION DU Syndicat national de l'édition

BILLETTERIE EN LIGNE > FESTIVALDULIVREDEPARIS.FR

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS - 60 RUE RÉAUMUR - PARIS 3e - LIGNES 3, 11 > ARTS ET MÉTIERS - LIGNE 4 > RÉAUMUR-SÉBASTOPOL

PLE RCS 908 002 940 - DESIGN : LAURIN / MEERLOO - ILLUSTRATION © MYRIAM WARES.

PARTENAIRES OFFICIELS

PILOT · PARIS LIBRAIRIES · Région îledeFrance

PARTENAIRES MEDIAS

LA PRESSE · LE FIGARO · marie claire · Le Point · radiofrance · france•tv

SOUTIENS INSTITUTIONNELS

VILLE DE PARIS · REFAIRE LE MONDE FESTIVAL DE LA FRANCOPHONIE · RATP · CFC SAVOIR PARTAGER LES SAVOIRS · GRAND PALAIS ÉPHÉMÈRE · pass Culture · sofia · CNL CENTRE NATIONAL DU LIVRE

PARTENAIRE QUÉBÉCOIS

Québec

AXEL KOCK/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ

Trois zones et réseaux cérébraux distinguant le cerveau d'un homme de celui d'une femme ont été identifiés.

Une différence cérébrale entre les deux sexes

Un algorithme identifie pour la première fois des schémas d'activation neuronale distincts chez les hommes et les femmes.

Les cerveaux féminin et masculin ne fonctionnent pas de la même manière. C'est ce que sont parvenus à démontrer pour la première fois des travaux menés à l'université Stanford (États-Unis). *« Notre étude fournit des preuves irréfutables de l'existence de différences sexuelles dans l'organisation fonctionnelle du cerveau humain »*, affirme le professeur en psychiatrie et sciences du comportement Vinod Menon, qui a dirigé l'étude publiée dans la revue *PNAS*. Des résultats qu'il qualifie de *« très surprenants »*, tant les études menées jusqu'à présent avaient échoué à trouver des différences cérébrales sexuées fiables.

Les chercheurs se sont adjoint un assistant efficace : une intelligence artificielle entraînée sur des centaines d'enregistrements cérébraux d'IRM fonctionnelle (IRMf), une méthode d'imagerie permettant de suivre en direct les schémas d'activation neuronale. L'algorithme a ainsi appris à distinguer avec une fiabilité de 90 % si des IRMf provenaient d'une femme ou d'un homme.

Aucune conclusion à en tirer sur le comportement

Trois zones et réseaux cérébraux distinguant les cerveaux féminins et masculins ont pu être identifiés : le striatum, le cortex orbitofrontal — tous deux impliqués dans des mécanismes d'apprentissage — et le réseau du mode par défaut, qui s'active lorsque l'esprit vagabonde, impliqué dans l'introspection. *« Nos résultats suggèrent que les femmes et les hommes diffèrent dans la manière dont ils engagent des circuits fonctionnels dynamiques impliqués dans les processus mentaux autoréférentiels, la sensibilité à la récompense, l'apprentissage par renforcement et les expériences subjectives de plaisir »*, détaillent les chercheurs. Tout en précisant qu'aucune conclusion sur *« la signification comportementale »* de ce dimorphisme ne peut être tirée en l'état. L'identification de ces différences pourrait mener à une meilleure prise en charge des troubles psychiatriques et psychologiques, qui varient selon le sexe des patients. **C. G.**

217

Le nombre de doses de vaccins anti-Covid reçues par une personne

IMMUNOLOGIE Un Allemand de 62 ans a reçu délibérément plus de 200 injections de huit vaccins différents contre le Covid-19, rapportent des chercheurs. L'examen de ce cas extraordinaire n'a révélé aucun affaiblissement du système immunitaire ni effet indésirable. En revanche, ses anticorps anti-Covid-19 sont au plus haut. **C. L.**

SOURCE : KATHARINA KOCHER, UNIVERSITÉ FRIEDRICH-ALEXANDER, ALLEMAGNE

Les organes sous la surveillance d'ultrasons portables

BIO-INGÉNIERIE Grâce à un circuit imprimé flexible envoyant des ondes ultrasonores, un patch biocompatible à appliquer sur la peau *(photo)* a permis d'établir le niveau de rigidité des tissus, indicateur de leur dégradation. Le procédé peut servir en continu sur 48 heures, ce qui s'avère très utile pour la surveillance d'une greffe. **A. D.**

SOURCE : HSIAO-CHUAN LIU, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE DU SUD, ÉTATS-UNIS.

HSIAO-CHUAN LIU ET AL./MIT

Une veste de surveillance contre la mort subite

CARDIOLOGIE Avec pas moins de 256 capteurs, un gilet d'électrocardiographie récemment testé chez 211 personnes a permis de mieux détecter un risque de cardiomyopathie hypertrophique qu'avec un électrocardiogramme classique pourvu de seulement 12 capteurs. Cette maladie, caractérisée par un épaississement et un raidissement des parois des ventricules, est la cause la plus fréquente de mort subite chez les jeunes. Or, elle est difficile à diagnostiquer, étant due la plupart du temps à une anomalie génétique. **H. J.**

SOURCE : GEORG JOY, UNIVERSITY COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.

JAMES TYE/UCL INSTITUTE OF CARDIOVASCULAR SCIENCE

Le gilet d'électrocardiographie, avec ses 256 capteurs, permet de détecter les signes précoces de cardiomyopathie.

AVC : pas d'oreiller avant une thrombectomie

CHIRURGIE **Afin de limiter les dégâts d'un accident vasculaire cérébral (AVC) en attendant une thrombectomie qui libérera l'artère bouchée dans le cerveau, mieux vaut garder la tête du patient à plat pour optimiser la qualité du flux artériel. C'est l'étonnante conclusion d'un essai clinique américain rapportée par l'Association américaine du cœur, qui recommande ainsi d'éviter de placer un oreiller sous la tête du malade.** **S. R.-M.**

LAURENT GALINIER ET AL.

Des lentilles en spirale pour voir plus net

OPHTALMOLOGIE Pour améliorer la netteté des lentilles de contact, une équipe a eu l'idée d'en modifier légèrement l'une des surfaces en lui donnant une apparence de spirale. Le vortex lumineux ainsi créé multiplie les points de focalisation (multifocalité) possibles et évite la déperdition de netteté lors des mouvements des yeux. Cette optimisation ouvre également la voie à une amélioration de la vue des patients opérés d'une cataracte. La multifocalité leur permettrait en effet de s'adapter plus facilement à l'implant remplaçant la cornée. **S. V.**

SOURCE : BERTRAND SIMON, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, FRANCE.

Une madeleine de Proust au secours des dépressifs

L'accès à des souvenirs positifs de patients souffrant de dépression est facilité en employant des odeurs.

DEEPOL BY PLAINPICTURE

En utilisant des odeurs plutôt que des mots-clés ou des images, des neuroscientifiques ont amélioré la capacité de patients dépressifs à se servir de leur mémoire autobiographique, celle qui nous permet de nous rappeler les événements précis de nos vies. Or, l'accès à cet aspect de la mémoire est très altéré dans la dépression. Lors d'un essai conduit auprès de 32 personnes souffrant de troubles dépressifs majeurs, les chercheurs montrent que les odeurs, outre qu'elles facilitent l'accès à cette mémoire autobiographique — comme le décrivait Marcel Proust avec la saveur de la madeleine dans *À la recherche du temps perdu* —, conduisent plus volontiers vers des souvenirs positifs. De quoi améliorer les séances de psychothérapie ciblant l'entraînement de la mémoire, qui jusqu'à présent se font à l'aide de mots ou d'images. L'équipe américaine prévoit d'utiliser l'imagerie cérébrale pour confirmer une activation plus forte de l'amygdale, centre des émotions et des souvenirs, lors de l'exposition aux odeurs. **C. G.**

1 milliard

Le nombre de personnes obèses dans le monde

ÉPIDÉMIOLOGIE **Entre 1990 et 2022, le taux d'obésité dans la population mondiale — 8 milliards de personnes — a quadruplé parmi les enfants et les adolescents et doublé parmi les adultes, indique une vaste étude menée en collaboration avec l'Organisation mondiale de la santé.** **H. J.**

SOURCE : NOWELL PHELPS, IMPERIAL COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.

B. FORMANN

QUESTIONS À

Pr Maik Pietzner

Épidémiologiste à la Queen Mary University de Londres (Royaume-Uni)

« Le jeûne accroît le risque de caillots sanguins »

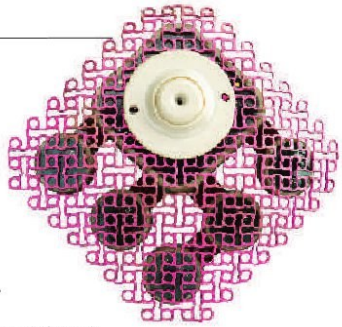
Une équipe a suivi les effets biologiques et métaboliques d'un jeûne de sept jours chez 12 participants ne pouvant boire que de l'eau. Le premier auteur de cette publication dans *Nature Metabolism* revient sur ses principales observations.

Quels sont les effets biologiques constatés ?
Dès les premières 24 heures, les hormones nécessaires à la reproduction ont cessé d'être sécrétées. Dans tous les organes principaux, des changements sont apparus dans la matrice extracellulaire, l'assemblage de molécules qui lie les cellules pour qu'elles forment un tissu. Surtout, les protéines de la structure des neurones étaient réduites dans le sang. Mais après avoir recommencé à manger, leur taux est vite revenu à la normale. Enfin, une perte de poids de 5,7 kg en moyenne a été observée.

Avez-vous remarqué des effets négatifs ?
Nous savions déjà qu'un jeûne supérieur à deux jours affecte la structure du cerveau, dont le fonctionnement est gourmand en glucose. Ici, alors que les participants étaient jeunes et en bonne santé, nous avons constaté un risque accru de caillots sanguins. Aucun d'entre eux n'a toutefois présenté de problèmes de cognition ou de bien-être.

Des conseils pour qui envisagerait un jeûne aussi long ?
Environ la moitié des changements métaboliques observés durant ce jeûne pourraient entraîner des effets négatifs. Cette étude a été menée dans un cadre très contrôlé, avec des consultations médicales quotidiennes et des critères d'inclusion stricts. Les personnes qui l'envisagent doivent toujours en parler d'abord à leur médecin.

Propos recueillis par C. L.


C. SENEHI, HEADSHOT PRO / CARTHERA

Un implant pour traiter le glioblastome

CANCÉROLOGIE Un dispositif innovant d'ouverture de la barrière hémato-encéphalique (BHE), structure cellulaire qui protège le cerveau des toxines en l'isolant de la circulation sanguine, va être testé chez 560 patients souffrant d'un glioblastome, cancer cérébral à l'origine de 3500 morts par an en France. L'implant intracrânien *(photo)*, développé en France par Carthera, envoie des ultrasons pulsés de faible intensité pour perméabiliser temporairement la BHE et faciliter ainsi la diffusion des molécules de chimiothérapie. **S. R.-M.**

110 % L'augmentation des cas de syphilis en France

INFECTIOLOGIE **Le nombre de cas de cette maladie sexuellement transmissible a plus que doublé dans l'Hexagone entre 2020 et 2022, selon le réseau de médecins généralistes Sentinelles qui établit l'incidence à 21 cas pour 100 000, dont neuf sur dix concernent des hommes. Un phénomène similaire est constaté aux États-Unis, où le nombre de cas a culminé à 207 255 en 2022, au plus haut depuis 1950.** **P. K.**

MYERS RESEARCH GROUP

La crésomycine est efficace contre les bactéries résistantes (ici « Klebsiella pneumoniae »).

Un antibiotique universel synthétisé en laboratoire

BACTÉRIOLOGIE Un antibiotique — la crésomycine — capable de stopper la prolifération des principales bactéries pathogènes a été mis au point, rapportent des chimistes américains. Synthétisée en laboratoire, elle s'est révélée, chez la souris, jusqu'à dix fois plus efficace que tous les antibiotiques classiques contre les bactéries, y compris des souches résistantes. **P. K.**

SOURCE : KELVIN WU, UNIVERSITÉ HARVARD, ÉTATS-UNIS.

Il n'est jamais trop tard pour arrêter le tabac

ÉPIDÉMIOLOGIE Arrêter de fumer avant 40 ans permet de retrouver l'espérance de vie d'un non-fumeur en trois ans, montre une vaste étude sur 1,48 million de personnes suivies pendant quinze ans. Même au-delà de cet âge, les bénéfices d'un arrêt du tabac sur la courbe d'espérance de vie sont significatifs : en moyenne, un sevrage de trois ans permet de gagner cinq années de vie et un arrêt de dix ans fait gagner dix années de vie. **H. J.**

SOURCE : EO RIN CHO, UNIVERSITÉ DE TORONTO, CANADA.

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

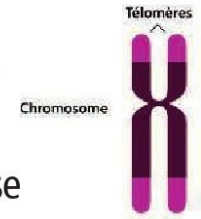
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

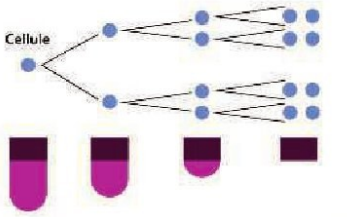
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

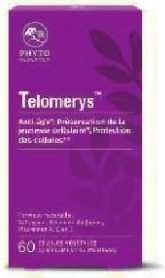
Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Des conseils ?

Les experts du laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 89 16 14 20** et sur www.telomerys.com

Telomerys™ :
Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

Un zoo fossile d'un demi-milliard d'années

Des centaines de fossiles datant du début de l'ordovicien ont été découverts dans l'Hérault.

CHRISTIAN MCGALL - F. SALEH - UNIL

Reconstitution artistique de la faune à partir de fossiles mis au jour à Cabrières, comme celui de ce gastéropode (en médaillon).

La persévérance finit par payer ! Voilà trente ans que Sylvie et Éric Monceret, paléontologues amateurs chevronnés, sillonnent la montagne Noire, tout près de Cabrières (Hérault). C'est sur son versant sud-est qu'ils ont découvert des centaines de fossiles datant du début de l'ordovicien (-485,4 à -443,4 millions d'années). *« On y retrouve tous les groupes d'invertébrés marins ainsi que beaucoup d'algues, et les fouilles ne font que commencer ! »*, se réjouit Bertrand Lefebvre, paléontologue à l'université de Lyon. Il y a 470 millions d'années, cette partie de la France se situait en bordure du supercontinent Gondwana, tout proche du pôle Sud. *« La température y était toutefois bien plus élevée — d'environ 10 °C — par rapport aux moyennes actuelles »*, précise-t-il.

Des organismes très bien préservés

Algues, éponges, vers, échinodermes, arthropodes… Entre 50 et 100 taxons ont déjà été identifiés dans la faune de Cabrières, et elle pourrait en receler au moins autant à découvrir. Tous ces organismes, mous ou biominéralisés, sont très bien préservés, et certains spécimens sont déjà à l'étude dans des laboratoires à Lyon, Brest ou Lausanne (Suisse). Une caractéristique commune semble déjà ressortir : les spécimens héraultais sont plus petits que ceux retrouvés dans d'autres gisements datant de la même époque, comme celui de Fezouata (Maroc). La grande biodiversité constatée confirme que ces espèces ont migré vers l'hémisphère Sud pour fuir les températures trop élevées des zones tropicales du début de l'ordovicien. Y résident aussi des spécimens datant du cambrien (-541 à -485,4 millions d'années), censés avoir disparu lors de l'extinction qui a marqué la fin de cette période. Les fouilles vont durer encore longtemps avant que les plus beaux d'entre eux puissent être exposés au public. ■ **J. I.**

IL A DIT

« [Les Danois] résultent d'un remplacement de population, avec une contribution génétique limitée de la part des chasseurs-cueilleurs locaux »

Eske Willerslev, généticien à l'université de Copenhague, montrant dans *Nature* que les Danois actuels descendent des pasteurs Yamnayas arrivés il y a 5000 ans.

La décimale est plus ancienne que prévu

MATHÉMATIQUES Alors que les historiens pensaient que l'astronome jésuite allemand Christopher Clavius était le premier à utiliser le point décimal en 1593, un chercheur canadien a découvert que Giovanni Bianchini, un astronome de la cour italienne, l'utilisait déjà quelque 150 ans auparavant. Dès les années 1440 en effet, il s'en servait pour rédiger ses tables astronomiques **H. J.**

SOURCE : GLEN VAN BRUMMELEN, UNIVERSITÉ TRINITÉ DE L'OUEST, CANADA.

G. VANBRUMMELEN

Tables trigonométriques de Giovanni Bianchini rédigées dans les années 1440.

ASSISTANCE RETRAITE

Graphiste : Sarah Sicsic Designer

BIEN CHOISIR UNE MAISON DE RETRAITE

Le défi éthique des générations

01.82.52.31.08
07 56 90 30 09
Réponse immédiate

100% Aidant

100% Disponible

100% Satisfait

Allô, Assistance Retraite !

- Une équipe d'experts **«passionnés et consciencieux»** à votre écoute tous les jours, de 8h à 19h.
- Un accompagnement sur mesure **«même en cas d'urgence»**.
- Une connaissance parfaite des maisons de retraite **«de l'intérieur»**.
- Un rendez-vous interactif pour vous aider **«à définir et à exprimer»** vos préférences et vos besoins.
- Une réponse dans l'heure avec **«un vrai choix»** de résidences strictement adaptées.
- Un soutien dans vos démarches **«aussi longtemps que vous le souhaitez»**.

laure@assistance-retraite.net
www.assistance-retraite.net

ASSISTANCE RETRAITE

Le plus vieux rouge à lèvres connu a 4000 ans

Cette fiole, découverte en Iran, renfermait une préparation cosmétique destinée à colorer les lèvres.

M. VIDALE, F. ZORZI

Le « tube » de près de 7 cm de longueur contenait une pâte à base d'hématite, de manganèse et de braunite.

Une petite fiole de chlorite retrouvée dans la région de Jiroft, au sud de l'Iran, à l'intérieur de laquelle étaient encore logés des résidus de pâte rouge foncé, nous rappelle que nos habitudes de maquillage n'ont pas beaucoup évolué au fil des millénaires. Selon les auteurs d'une étude publiée dans la revue *Scientific Reports*, ce petit objet délicat daté d'entre 1936 et 1687 avant J.-C. est l'un des plus vieux tubes de rouge à lèvres jamais recensés. L'objet a été découvert en 2001, lorsque la rivière Halil a inondé plusieurs anciens cimetières de la région et y a délogé des artefacts des sépultures. Les chercheurs ont établi que la fiole contenait une préparation cosmétique d'un rouge profond qui s'apparentait à *« une peinture ou une pâte colorante pour les lèvres »* dont les composants, en grande partie minéraux, étaient de l'hématite assombrie par du manganite et de la braunite. Selon les auteurs, le mélange ressemble étrangement aux *« recettes des rouges à lèvres contemporains »*. Il serait lié à la puissante civilisation iranienne de Marhaši, qui se développa entre 2500 et 1900 avant J.-C. **M. B.**

Un virus a modifié notre cerveau

ÉVOLUTION Et si un rétrovirus était responsable de l'architecture de notre cerveau ? Une séquence génétique dérivée d'un tel virus a en tout cas été identifiée dans le cerveau des vertébrés à mâchoires. Elle est indispensable à la synthèse de myéline, une substance qui contribue à une conduction plus rapide des impulsions nerveuses et sert de structure de soutien aux nerfs. Ce qui a contribué à former des cerveaux plus denses et des organismes plus gros. **J. I.**

SOURCE : TANAY GOSH, UNIVERSITÉ DE CAMBRIDGE, ROYAUME-UNI.

Ce célèbre fossile de lézard est un faux

PALÉONTOLOGIE Découvert dans les Alpes en 1931, ce fossile de *Tridentinosaurus antiquus*, vieux de 280 millions d'années, était considéré comme une pièce importante pour comprendre l'évolution des reptiles ancestraux. Hélas, de nouvelles analyses indiquent que ce lézard parfaitement préservé est partiellement un faux : de la peinture noire compose sa peau, tandis que sa forme a été sculptée dans la roche. Seuls les fémurs et quelques écailles osseuses du dos semblent authentiques. **J. I.**

ZIXIAO YANG

La chercheuse Valentina Rossi, qui a révélé la supercherie.

SOURCE : VALENTINA ROSSI, UNIVERSITY COLLEGE CORK, IRLANDE.

Comment nos ancêtres ont perdu leur queue

ÉVOLUTION **Une équipe vient d'identifier un petit gène sauteur (AluY), morceau d'ADN errant dans le génome, qui aurait suffi à faire disparaître la queue chez l'ancêtre commun des hominoïdes il y a 25 millions d'années, et favorisé ainsi la bipédie. Une thèse éprouvée chez des souris génétiquement modifiées pour naître sans queue. J. I.**

SOURCE : BO XIA, UNIVERSITÉ HARVARD, ÉTATS-UNIS.

MUSÉE NATIONAL DU DANEMARK

La bague sertie d'une pierre rouge daterait de l'époque mérovingienne.

Un cadeau diplomatique en or

ARCHÉOLOGIE C'est dans un champ du Jutland, au Danemark, qu'un « détectoriste » a mis au jour cette bague en or sertie d'une pierre rouge semi-précieuse exceptionnelle. Selon les experts, ses motifs finement exécutés indiquent qu'elle serait étroitement liée aux Mérovingiens, qui régnèrent sur le royaume franc du Ve au VIIIe siècle. Elle pourrait avoir appartenu à la fille d'un prince local dont la lignée aurait entretenu des liens diplomatiques avec les rois francs. **M. B.**

1,4 million d'années

La plus vieille preuve de présence humaine en Europe

ANTHROPOLOGIE Une nouvelle technique de datation révèle l'ancienneté d'outils en pierre découverts dans les années 1970 à Krovelo, dans l'ouest de l'Ukraine, faisant de ce site le plus ancien peuplé d'hominidés en Europe. Il s'agirait d'*Homo erectus* selon l'étude, mais l'absence d'ossements empêche de s'en assurer. **H. J.**

SOURCE : ROMAN GARBA, INSTITUT D'ARCHÉOLOGIE DE PRAGUE, RÉPUBLIQUE TCHÈQUE.

GOVERNMENT OF NAVARRE - J.L. LARRION.

Restes d'un individu atteint de trisomie 21 mis au jour en Espagne et datant de l'âge du fer.

L'ADN ancien révèle des trisomies

PALÉOGÉNÉTIQUE Six cas de syndrome de Down (trisomie 21) et un cas de syndrome d'Edwards (trisomie 18) ont été identifiés sur des squelettes préhistoriques provenant de toute l'Europe et dont le plus vieux date de l'âge du bronze, il y a 5500 ans. Tous ont reçu des soins *post mortem* attentionnés, certains étant même enterrés avec des objets funéraires élaborés. **J. I.**

SOURCE : ADAM RORHLACH, INSTITUT MAX-PLANCK, ALLEMAGNE.

INSCRIBE AND RESOLUTION ERC TEAMS

Cette tablette en bois couverte de glyphes retrouvée sur l'île a été gravée au XV[e] siècle, près de 300 ans avant l'arrivée des Européens.

L'île de Pâques avait sa propre écriture

PALÉOGRAPHIE Le rongorongo, mystérieux système de signes gravés sur tablettes en bois retrouvées au XIX[e] siècle sur l'île de Rapa Nui, aurait bien été inventé et utilisé avant la découverte du territoire par l'Occident en 1722. La datation au carbone 14 de l'une de ces tablettes a révélé qu'elle avait été gravée au milieu du XV[e] siècle, bien avant toute influence extérieure. La mystérieuse écriture reste indéchiffrable. **H. J.**

SOURCE : SILVIA FERRARA, UNIVERSITÉ DE BOLOGNE, ITALIE.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

NATUREPL/ EBPHOTO - NASA - SCIENCES & AVENIR - AFP

ARCHÉOLOGIE

Le dingo, meilleur ami des peuples autochtones australiens

Les populations de l'Australie précoloniale domestiquaient les dingos, des chiens considérés comme sauvages aujourd'hui. Il y a deux millénaires, ils contribuaient à la pérennité des humains et étaient même enterrés en imitant les rites funéraires. À lire sur le site de *La Recherche*. bit.ly/lrdingo

HISTOIRE

Qui étaient vraiment les Vikings ?

Créateur de la chaîne YouTube « Nota Bene » et star de la vulgarisation historique du Web français, Benjamin Brillaud est venu évoquer sa passion pour les Vikings et le documentaire qu'il consacre à ces peuples du Nord sur la chaîne Twitch de *Sciences et Avenir*. À découvrir en replay. sciav.fr/926vik

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

L'Univers vu par le JWST

Depuis juillet 2022, le télescope spatial James-Webb scrute l'Univers et le photographie. À la clé, des dizaines d'images époustouflantes d'objets et de structures cosmiques. sciav.fr/926jwst

5 minutes

L'eau sous la montagne

Au pied du Mont-Blanc, des kilomètres de galeries creusées dans la montagne captent l'eau de fonte de la mer de Glace pour alimenter une centrale électrique. Reportage vidéo. sciav.fr/926mglace

10 minutes

« Compétition féroce »

Antoine Petit, P-DG du CNRS, revient sur l'état de la recherche scientifique en France en 2024, et notamment sur l'insertion des jeunes doctorants dans le monde du travail. sciav.fr/926cnrs

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Une naine blanche (à droite) attire l'hydrogène d'une géante rouge. La pression de ce gaz exercée sur la petite étoile provoque des réactions de fusion nucléaire qui l'illuminent. C'est le phénomène de nova (vue d'artiste).

SUPERBOSSA.COM/MPP

Nova

Une étoile va illuminer le ciel d'avril

Une « nouvelle » étoile visible à l'œil nu devrait apparaître dans la constellation de la Couronne boréale très prochainement. Ce phénomène de nova, attendu avec impatience par les astronomes, a été observé dès le XIIIe siècle et se reproduit tous les 80 ans. Explications.

Par Fabrice Nicot

S'allumera ? S'allumera pas ? En ce mois d'avril, les astronomes scrutent avec une attention particulière la Couronne boréale, ou Coronae Borealis, une petite constellation de l'hémisphère Nord. Ils ont rendez-vous avec une vieille connaissance, T Coronae Borealis (T CrB), une étoile qui fait son show tous les quatre-vingts ans environ. Alors qu'elle est invisible à l'œil nu, sa luminosité augmente brutalement en quelques jours, pour atteindre à peu près l'éclat de l'étoile Polaire, avant de s'éteindre rapidement les jours suivants et pour huit décennies. Ce phénomène constitue une nova. T CrB a déjà été observée en 1886 et 1946. Mais Bradley Schaefer, professeur d'astronomie et d'astrophysique à l'université d'État de Louisiane (États-Unis), a retrouvé sa trace jusqu'en 1217, dans le témoignage d'un moine près d'Augsbourg, en Allemagne. Et selon lui, elle devrait prochainement se manifester…

« À partir de février 2015, T CrB est devenue un peu plus lumineuse, constate l'astronome. *Un comportement identique à celui de 1935 qui a abouti à l'événement de 1946.* » Ce petit sursaut marque les prémices d'une nouvelle séquence, avec une montée en puissance irrégulière : la luminosité a brutalement rechuté en mars 2023. *« La même chose avait été observée environ un an avant l'éruption de 1946. Si T CrB se comporte comme elle l'a fait dans les années 1940, il y a 95 % de chance qu'elle éclate en*

2024. Et 68 % que cela se produise entre février et août, avec une préférence pour avril. Toutefois, il se peut toujours que des perturbations imprévues aient pu faire dévier le timing entre 1946 et 2024, c'est pour cela que je ne parierais pas ma maison sur l'exactitude de cette prédiction, mais il y a peu de choses sur lesquelles je parierais ma maison », constate avec humour Bradley Schaefer.

DIDIER GOUPY/SIGNATURES

« Si la naine blanche accrète davantage de matière, et plus vite, son destin sera différent. Elle donnera une supernova »

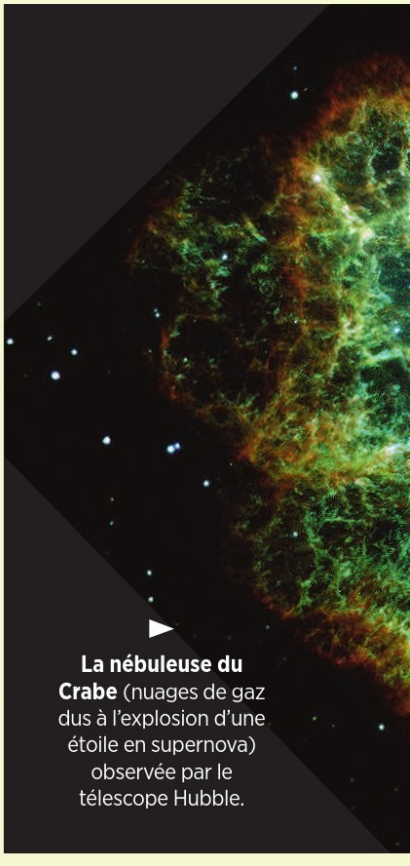
Nicolas Prantzos, astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris

Ce spectacle correspond en réalité aux éclats d'un couple d'étoiles en fin de vie qui se déchirent, littéralement. D'un côté, une géante rouge, une étoile dilatée cent fois plus grande que notre Soleil, la préfiguration de ce qu'il sera lui-même dans 5 milliards d'années, lorsqu'il aura fusionné tout l'hydrogène de son cœur. De l'autre, une naine blanche, une étoile dans un stade encore plus avancé de vieillissement. C'est le cadavre encore très chaud d'une étoile de masse moyenne ayant fusionné, là encore, tout le gaz de son cœur. Il est très compact, sa densité moyenne atteignant une tonne par centimètre cube. Les deux corps se tournent autour dans un ballet mortifère, comme l'explique Nicolas Prantzos, astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris. *« La partie supérieure de la géante rouge se trouve loin du cœur de l'étoile. Elle est alors davantage sensible à l'attraction gravitationnelle de la naine blanche qui va accréter cette matière.* » La naine blanche se trouve ainsi peu à peu recouverte d'une sorte de pellicule tissée avec le gaz d'hydrogène de sa partenaire. Mais celui-ci pèse sur elle, augmentant sa pression et sa température jusqu'à ce que, d'astre mort, elle reprenne vie momentanément. *« L'hydrogène de la géante rouge fusionne alors avec le carbone qui com-*

SUPERNOVAE

Des fabriques d'atomes lourds

Qu'elle soit de type I ou II, une supernova parachève le rôle de forge à atomes dévolu aux étoiles. Elles en fabriquent tout au long de leur existence, par fusion des noyaux d'atomes de plus en plus massifs, depuis l'hydrogène jusqu'au fer, trop stable pour fusionner. L'étoile se trouve alors privée de l'énergie dégagée par la fusion qui s'opposait à la gravitation. Dans un premier temps, les électrons autour des noyaux de fer exercent une pression qui lutte encore contre l'effondrement. Mais la masse de fer augmente car si la fusion a cessé au cœur de l'étoile, elle se poursuit dans les couches externes. Lorsque la masse critique de Chandrasekhar est franchie, soit 1,4 masse solaire, les effets de pression des électrons ne suffisent plus à contrebalancer la gravité. Les noyaux de fer se trouvent dissociés en protons et neutrons à touche-touche. Puis les protons se changent en neutrons : ainsi naît l'étoile à neutrons. Le cœur est passé de la taille de la Terre (6000 kilomètres de rayon environ) à une dizaine de kilomètres. Sa densité est telle qu'un seul centimètre cube de poussière d'étoile à neutrons pèserait 100 millions de tonnes. Impossible de le presser davantage. Lorsque les couches supérieures de l'étoile en chute libre arrivent sur ce cœur quasiment incompressible, c'est l'explosion en supernova. Cette explosion va générer toute une collection de noyaux plus lourds que le fer, comme le décrit Thierry Foglizzo, astrophysicien à l'Irfu (CEA Paris-Saclay) : *« Lors de l'explosion, les atomes de fer sont bombardés par le flux de neutrons. Ces particules électriquement neutres peuvent pénétrer le noyau sans être repoussées par la charge électrique des protons. Une fois dans le noyau, les neutrons se changent en protons. Or, c'est*


NASA, ESA ET ALLISON LOLL/JEFF HESTER (ARIZONA STATE UNIVERSITY)

La nébuleuse du Crabe (nuages de gaz dus à l'explosion d'une étoile en supernova) observée par le télescope Hubble.

pose en grande partie la naine blanche. L'énergie dégagée par ces réactions de fusion peut faire grimper la température à 200 ou 300 millions de degrés [la température au centre du Soleil est de 15 millions de degrés]. *Et c'est l'explosion.* »

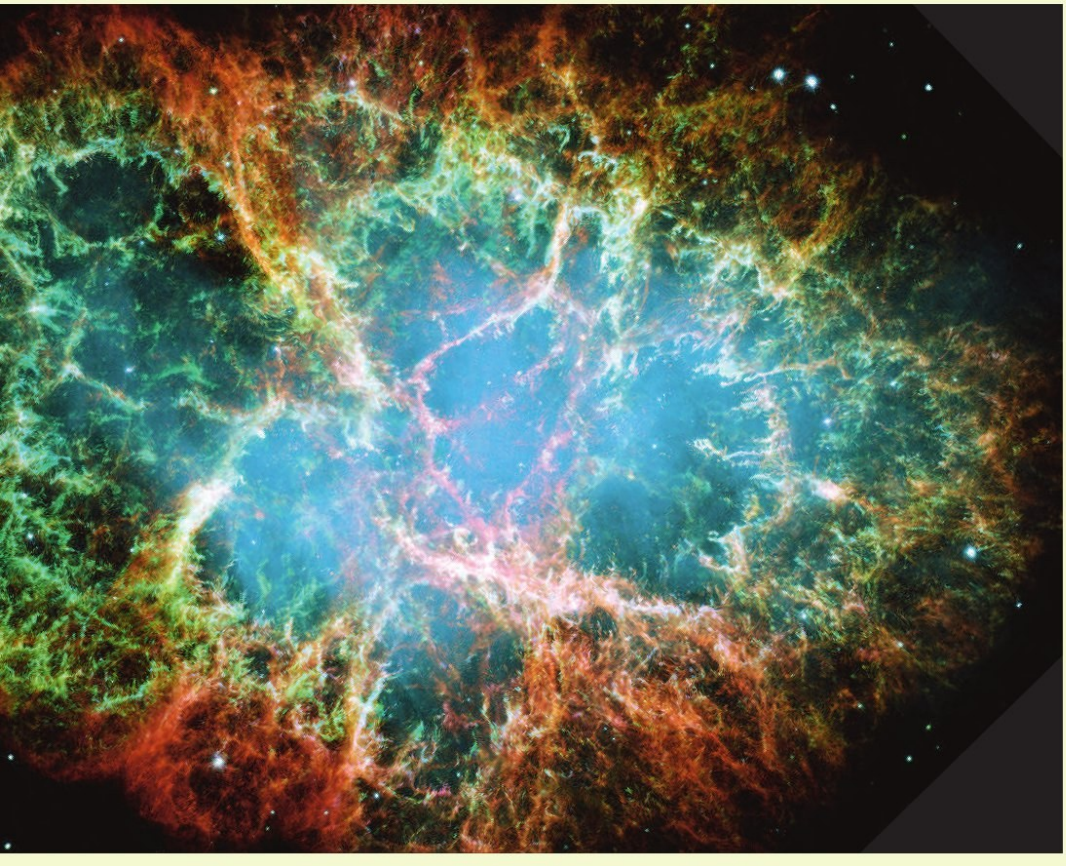
40 novae se produisent chaque année dans notre galaxie

Environ 1/100 000 de la masse de la naine blanche se trouve alors converti en énergie, ce qui provoque une forte hausse de la luminosité. Voilà d'où vient précisément le phénomène de nova. À peine débarrassé de sa pellicule, T CrB en commence une autre. Et c'est reparti pour un cycle qui va durer environ quatre-vingts ans…

Ce mécanisme de nova est d'autant plus intéressant qu'il constitue une version minimaliste d'un spectacle bien plus grandiose : la supernova. « *Si la naine blanche accrète davantage de matière, et plus vite, son destin sera différent,* détaille Nicolas Prantzos. *Il peut y avoir encore quelques explosions de surface comme sur une nova, mais si la matière s'accumule trop rapidement, elle dépasse la masse de Chandrasekhar qui est de 1,4 masse solaire. Il s'agit d'une valeur critique au-delà de laquelle la naine blanche s'effondre sur elle-même pour former une étoile à neutrons. La température monte brutalement, et elle "allume" alors tout son combustible nucléaire. Cette fois, ce n'est pas 1/100 000 de la naine blanche qui disparaît, mais l'astre tout entier. Elle devient très lumineuse et donne une supernova.* »

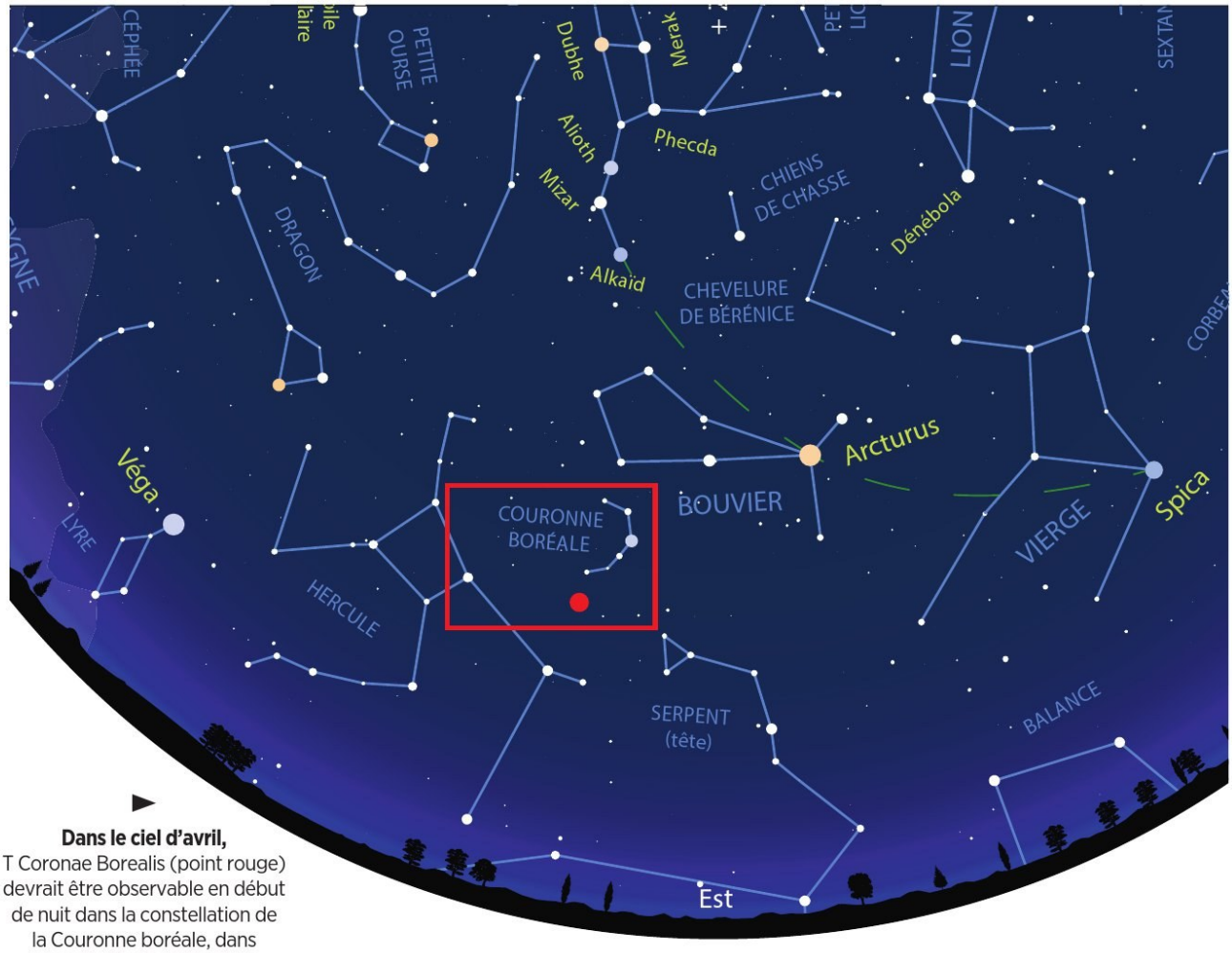
Voilà pourquoi, à la différence d'une nova, une supernova est un spectacle qui ne se joue qu'une fois. Il est ainsi beaucoup plus rare. Alors qu'on estime à environ 40 par an le nombre de novae dans notre galaxie (mais elles ne sont pas toutes visibles depuis la Terre), il ne s'y produirait que quatre supernovae par siècle… Sachant qu'il existe deux grandes catégories de supernovae : la « Ia » donc, et celle de type de II, dite par effondrement de cœur. Dans ce cas, seul un astre est impliqué dans le phénomène : l'étoile dont le cœur de fer atteint la masse de Chandrasekhar s'effondre sous son propre poids, et son cœur se transforme en étoile à neutrons.

Novae et supernovae intéressent les scientifiques à plusieurs titres. D'abord, ils s'accompagnent de la formation d'un grand nombre d'atomes *(lire l'encadré ci-dessous)*, comme le souligne Nicolas Prantzos : « *Par exemple, les novae sont "spécialisées" dans la fabrique du lithium.*



le nombre de protons qui détermine la nature de l'atome. À partir du fer (26 protons), l'explosion va donc forger des noyaux plus lourds jusqu'à l'argent (47 protons). »

Et au-delà de l'argent ? *Quid* de l'or (79 protons) ? de l'uranium (92 protons) ? « *C'est un domaine de recherche très actif,* reprend Thierry Foglizzo. *Globalement, on pense que la proportion de neutrons lors de l'explosion est insuffisante pour fabriquer des noyaux au-delà de l'argent. Les éléments très lourds seraient formés lors de collisions entre étoiles à neutrons, ce que l'on appelle des "kilonovae". De tels chocs cataclysmiques ont été enregistrés grâce aux ondes gravitationnelles émises à cette occasion.* »



Dans le ciel d'avril, T Coronae Borealis (point rouge) devrait être observable en début de nuit dans la constellation de la Couronne boréale, dans l'hémisphère Nord.

Pourquoi lui ? Parce que cet atome est fragile. Or, les explosions de novae étant plus "douces" que les supernovae, elles ne détruisent pas le lithium qu'elles engendrent. Les modèles indiquent qu'elles génèrent ainsi environ un peu plus de la moitié du lithium de l'Univers, ce qui correspond bien aux observations faites sur les novae (environ un tiers provenant du Big Bang, les 20 % restants sont fabriqués par les rayons cosmiques qui cassent les atomes de carbone et d'oxygène). » Observer ces phénomènes donne donc accès à la genèse de toute la classification périodique des éléments.

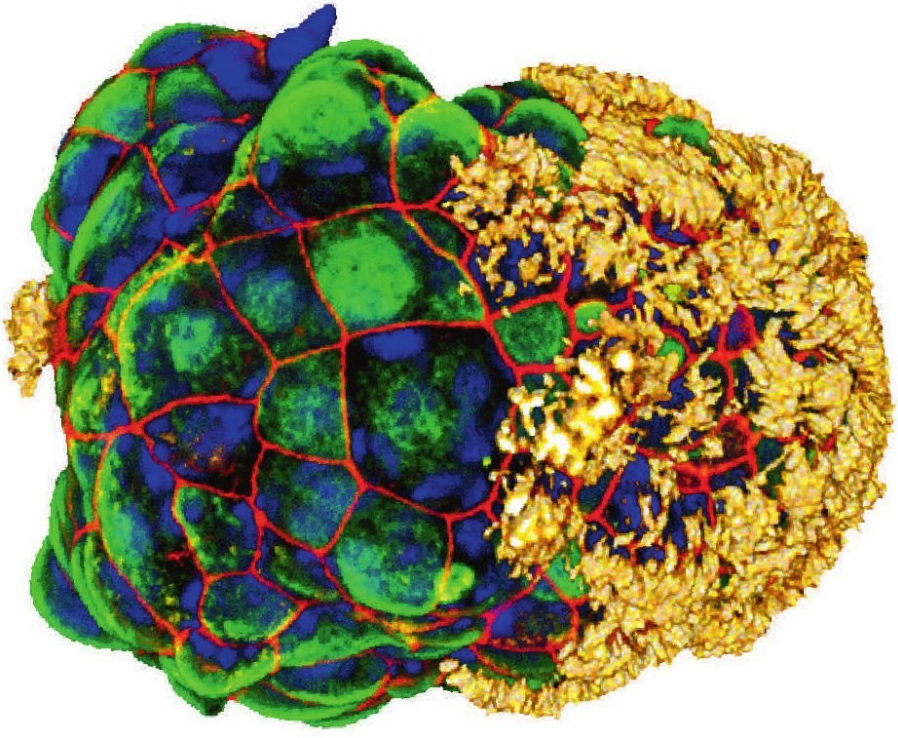
Une explosion asymétrique qui intrigue les chercheurs

Le mécanisme de l'explosion lui-même intrigue aussi les astronomes, souligne Thierry Foglizzo, astrophysicien à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu, CEA Paris-Saclay) : « *Le scénario décrivant la nova n'est pas si clair que cela, comme le pointe d'ailleurs Bradley Schaeffer lui-même dans un article paru en juillet 2023 dans* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. *Il fait remarquer que les modèles ne rendent pas compte de toutes les observations. Comme le couple naine blanche-géante rouge perd de la masse lors de l'explosion, on s'attendrait à ce que les deux astres s'éloignent, puisque l'attraction gravitationnelle entre eux s'affaiblit. Or, on observe bien dans certains cas un éloignement, mais dans d'autres il y a rapprochement !* »

Selon Bradley Schaeffer, cette dernière configuration s'explique sans doute par la nature asymétrique de l'explosion. Alors que les modèles théoriques supposent qu'une telle déflagration se produit de la même façon dans toutes les directions, comme une coquille d'énergie se détachant de la naine blanche, elle est sans doute parfois asymétrique. « *L'expulsion d'énergie n'étant pas identique dans toutes les directions, cela peut dans certains cas "pousser" la naine blanche vers la géante rouge,* détaille Thierry Foglizzo. *Cette asymétrie est très intéressante, car nous la retrouvons aussi dans les supernovae par effondrement de cœur. Le fait qu'elle se produise sur les novae, bien plus fréquentes que les supernovae, est donc susceptible de nous renseigner sur ce phénomène étrange.* » Voilà pourquoi plusieurs observatoires au sol et dans l'espace seront au rendez-vous de T CrB, dès que le show débutera… ■

Un robot fait de cellules humaines

Sans aucune modification génétique, des chercheurs ont réussi à assembler des cellules de la trachée humaine pour en faire une entité autonome et mobile. Première mission réussie pour cet « anthrobot » : la réparation de tissus neuronaux endommagés.



GIZEM GUMUSKAYA ET AL., 2023 ADVANCED SCIENCE

L'organoïde multicellulaire, fruit d'un auto-assemblage de cellules, se déplace grâce à ses « cils » (en jaune).

De la cellule au robot, il n'y a qu'un pas… « *Tout a commencé par une question : pouvons-nous utiliser uniquement des cellules pour produire quelque chose de complètement nouveau ?,* se souvient Gizem Gumuskaya, biologiste à l'université Tufts (États-Unis). *Et il se trouve que justement, il existe dans la nature toutes les propriétés formidables dont on pourrait avoir besoin ! Quelles propriétés ? Autoconstruction, locomotion, guérison, réplication… Soit tout ce qu'il faut pour créer un robot cellulaire qu'on pourrait appeler "vivant"* ». Des chercheurs américains viennent ainsi d'exploiter ces capacités dans les cellules de la trachée humaine pour créer un amas de cellules autonome et mobile, qu'ils ont nommé « anthrobot ». À terme, espèrent-ils, ces « biobots », pourraient patrouiller dans l'organisme pour délivrer des médicaments, nettoyer les artères, ou encore réparer des tissus… *(Lire l'encadré p. 34.)* En effet, les scientifiques ont d'ores et déjà observé que l'anthrobot stimule spontanément la répara-

tion de tissus neuronaux endommagés. *« Il s'agit de travaux préliminaires mais très prometteurs quant à la personnalisation des traitements, car les biobots peuvent être conçus à partir des cellules du patient, et ainsi garantir une biocompatibilité totale »*, avance Gaëtan Bellot, chercheur CNRS au Centre de biologie structurale de l'Inserm.

Pour créer une structure vivante à partir de cellules, il existe deux méthodes, qui ont vu le jour aux États-Unis dans les années 2000 et ont été développées parallèlement depuis. La première consiste à manipuler génétiquement des cellules pour leur fournir les informations nécessaires au développement du robot souhaité. *« C'est une technique très laborieuse car elle prend du temps,* indique Gizem Gumuskaya. *Il faut connaître l'expression de chaque gène et les agencer entre eux, un peu comme des Lego, pour que le code génétique créé aboutisse à la forme du biobot recherché. »* La deuxième approche, qui tend à prendre de plus en plus d'ampleur, repose sur l'étude des propriétés des cellules : leur capacité à faire pousser des cils, par exemple, ou encore à communiquer entre elles. De la fascination pour ces propriétés intrinsèques aux cellules, sont nés les premiers robots biologiques, appelés xénobots.

C'est en 2020 qu'ils furent présentés, déjà à l'université Tufts, en collaboration avec les universités du Vermont et Harvard (États-Unis). Et ce sont eux qui inspireront, trois ans plus tard, les anthrobots conçus par Gizem Gumuskaya. Le xénobot n'était pas constitué de cellules humaines, mais de cellules d'embryon d'une grenouille sud-africaine, *Xenopus laevis* — d'où son nom. À partir de cellules souches, les chercheurs ont façonné de minuscules organismes sphériques, capables de se déplacer à la surface d'une boîte de Petri grâce à leurs cils. Plus étonnant encore, le xénobot peut se répliquer. Une capacité liée à sa morphologie. Les biologistes ont interrogé une intelligence artificielle quant à la forme optimale qui permettrait au robot de s'autoreproduire. Sur ses conseils, ils ont ainsi sculpté une petite cavité à la surface du robot, à l'aide d'électrodes et de pinces chirurgicales. Ils ont alors observé que le biobot se mettait à sillonner la boîte de Petri à la recherche de cellules souches qu'il accumulait pour les convertir en nouveau xénobot ! *« C'est une aptitude que ne possède pas l'anthrobot et que nous ne voulons pas qu'il développe, car l'objectif est de l'utiliser à des fins médicales, et donc, à terme, de l'introduire dans l'organisme des patients. Nous devons contrôler sa reproduction pour empêcher sa prolifération »*, prévient Gizem Gumuskaya.

L'autoconstruction, une propriété singulière des cellules

Pour développer son « biobot » à base de cellules humaines, la chercheuse a dû procéder différemment. *« Il n'était pas possible de reproduire la démarche expérimentale utilisée avec les cellules de grenouille, puisqu'on ne peut légalement pas utiliser les cellules souches d'embryons humains »*, rappelle-t-elle. L'anthrobot, lui, est donc le résultat d'un assemblage spontané de cellules de la trachée. Si ce sont elles qui ont été choisies, c'est qu'elles présentent des propriétés tout à fait singulières. À commencer par l'autoconstruction. *« Nous avons réalisé un prélèvement de cellules trachéales pour explorer leurs*

TRAITEMENTS

L'espoir d'un nouvel outil thérapeutique

Si l'anthrobot suscite un grand espoir chez les scientifiques pour une application thérapeutique, c'est que sa machinerie est identique à celle du patient chez qui les cellules trachéales ont été prélevées. La biocompatibilité est donc quasi totale. Dans un premier temps, ces biobots pourraient contribuer à personnaliser la prescription de molécules. Les traitements seraient testés directement sur les anthrobots, ce qui permettrait aux chercheurs d'observer leurs effets sur la machinerie cellulaire du patient par leur intermédiaire. Mais l'ambition de l'équipe de l'université Tufts (États-Unis) est d'intervenir, à terme, directement dans le corps humain. *« Leur objectif est de combiner les différentes propriétés des cellules, la sécrétion de molécules ou la détection de signaux, par exemple, pour aboutir à de nouveaux outils thérapeutiques efficaces »*, analyse Philippe Fraisse, directeur du groupement de recherche Robotique du CNRS. Dans l'organisme même, les robots cellulaires pourraient examiner une zone pour détecter les marqueurs d'apparition de tumeurs, ou encore détruire des plaques d'athérome dans les artères. On peut aussi imaginer les envoyer éliminer des bactéries dans les intestins ou réparer des lésions dans différents tissus, comme une déchirure rétinienne. Sans parler, dans un avenir plus lointain, de leur contribution possible à la création de tissus artificiels transplantables.

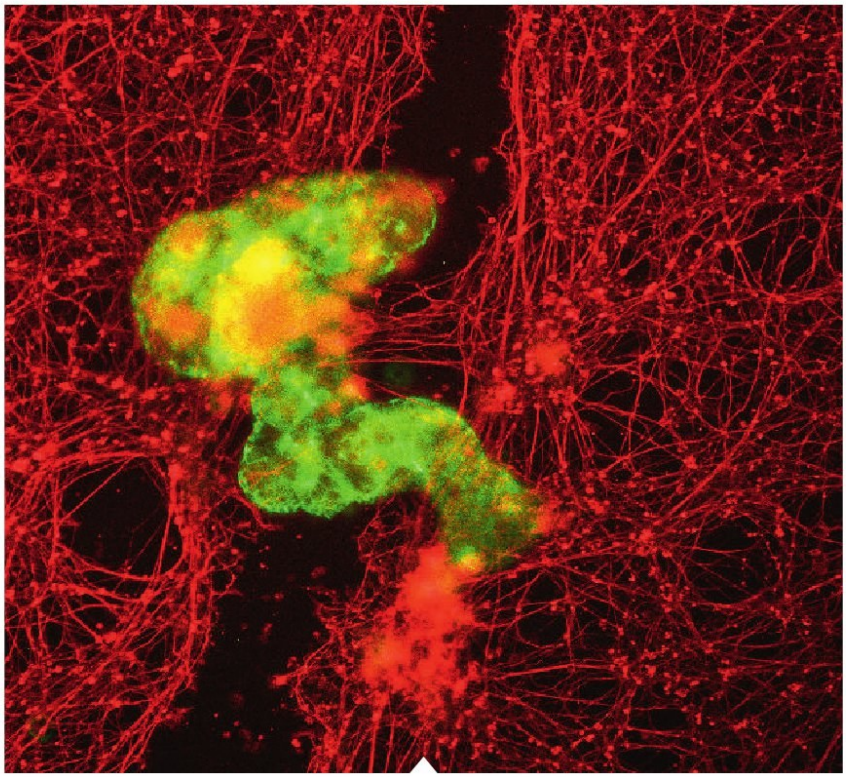
capacités en dehors du conduit respiratoire », explique Gizem Gumuskaya. En les déposant sur une matrice mimant les conditions biologiques au sein de l'organisme, les scientifiques s'aperçoivent que ces cellules se divisent, pour former une petite sphère multicellulaire. Un premier paramètre propice au déplacement. Restait à trouver un moteur…

Les biobots sont capables de réparer les neurones

Or, ces cellules sont aussi capables de générer des cils microscopiques et mobiles. Dans la trachée, ils servent à filtrer les particules étrangères que nous inhalons pour les expulser en toussant. Seul ennui : les cils se développent spontanément à l'intérieur de la sphère, et non à sa surface. *« C'est un peu comme si les cellules recréaient la trachée. On parle d'organoïde, une version simplifiée d'un organe »*, résume la chercheuse. Les biologistes ont alors eu l'idée de retirer les futurs anthrobots de la matrice et de les immerger dans un milieu liquide pour « tromper » les cellules et favoriser la croissance des cils vers l'extérieur. Avec ces « rames » au mouvement régulier et automatique, les biobots se déplacent de manière autonome. Certains en ligne droite, d'autres en cercle, en fonction de leur forme et de la répartition des cils à leur surface. Voici enfin ces petits amas pluricellulaires sphériques et mobiles qui *« correspondent à la structure que nous souhaitions développer »*, se réjouit Gizem Gumuskaya.

La plus grande surprise restait à venir, avec la découverte de cette capacité à réparer des neurones. Elle s'est produite quand les chercheurs ont déposé les biobots dans une boîte de Petri, au contact d'un tissu neuronal sur lequel avait été infligée une éraflure. De façon inattendue, les anthrobots se sont regroupés en structures plus grandes et ont permis une cicatrisation du tissu, en créant une liaison aussi épaisse que dans le reste du tissu. *« Les anthrobots n'ont pas simplement servi de tuteurs aux neurones,* précise-t-elle. *Sécrètent-ils une molécule qui favorise leur cicatrisation ou s'agit-il d'un autre type de signalisation ? Nous ne le savons pas encore. »* C'est en tout cas un exploit si l'on considère que cet auto-assemblage de cellules trachéales n'a subi aucune modification génétique ni induction moléculaire ! La prochaine étape consiste à confronter les anthrobots à des neurones affectés par un agent pathogène.

Les chercheurs continuent donc d'explorer les propriétés de leurs robots cellulaires. Ils imaginent possible que ceux-ci puissent s'orienter grâce à des *stimuli* chimiques (chimiotaxie). Une hypothèse qui reste à tester. Par la suite, *« pour contrôler ces petits robots, des modifications génétiques ou des signaux moléculaires seront nécessaires »*, estime Gaëtan Bellot. N'ont-ils pas peur que leur créature leur échappe ? *« En dehors de l'environnement hypercontrôlé de la boîte de Petri en laboratoire, les biobots se dégradent naturellement au bout d'une cinquantaine de jours »*, assure le biologiste. Un argument de taille si l'on envisage de les introduire dans l'organisme des patients. ■ **Marie Parra**



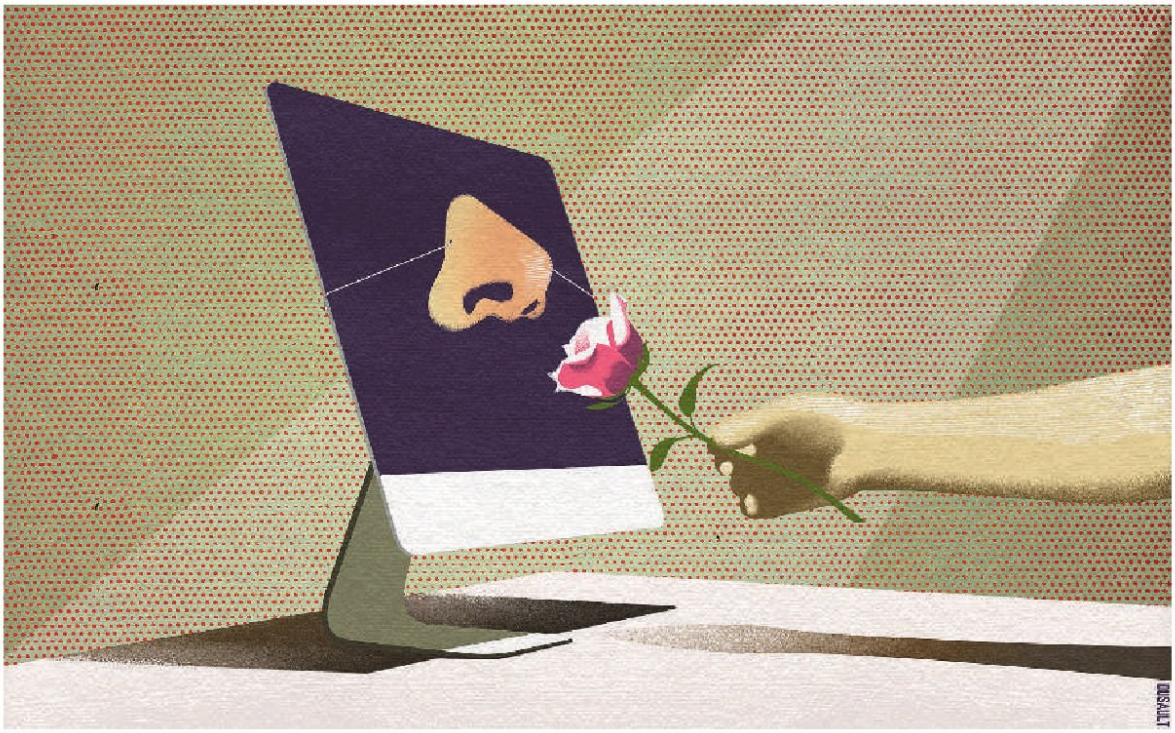
GIZEM GUMUSKAYA ET AL., 2023 ADVANCED SCIENCE

L'anthrobot (en vert) se développe dans le tissu neuronal (en rouge), comblant la partie endommagée située au milieu de l'image.

TUFTS UNIVERSITY

« C'est un peu comme si les cellules recréaient la trachée. On parle d'organoïde, une version simplifiée d'un organe »

Gizem Gumuskaya, biologiste à l'université Tufts (États-Unis)



ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Des algorithmes s'attaquent aux odeurs

Contrairement à la vision ou à l'audition, le sens de l'odorat est très difficilement simulé par l'intelligence artificielle, en raison de la nature des données. Mais une méthode, dite des réseaux de neurones en graphes, est en passe de changer la donne.

Les performances impressionnantes de grands modèles de langage peuvent entretenir l'illusion que l'IA à base d'apprentissage automatique est capable de tout faire. Or, elle bute sur nombre d'impasses. La simulation du sens de l'odorat en est une. D'abord parce que le fonctionnement des récepteurs olfactifs n'est pas encore complètement compris. « *Dès avant la percée de la vision par ordinateur ou la modélisation du son, on connaissait beaucoup de choses sur les ondes sonores et lumineuses et on savait les mesurer avec précision. Ce n'est pas le cas en matière d'olfaction, les parfumeurs se servent seulement de mots pour décrire les différences entre odeurs* », explique Matej Hladiš, doctorant à l'Institut de chimie de Nice (Côte-d'Azur). S'y ajoute la difficulté à constituer des bases de données d'entraînement. On peut facilement collecter et stocker des images et des sons depuis Internet. Pour les odeurs, c'est plus laborieux. « *Il faut faire venir des gens dans un endroit dédié, équipé et ventilé correctement, pour leur présenter des fioles d'odorants* », continue Matej Hladiš. D'où des corpus bien moins volumineux que pour les images.

6054

molécules associées à des senteurs figurent dans la base de données Leffingwell, la plus vaste du genre. À comparer aux 14,2 millions d'images du corpus ImageNet.

M. HLADIŠ

> « Dès avant la percée de la vision par ordinateur, on savait beaucoup de choses sur les ondes lumineuses. Ce n'est pas le cas en matière d'olfaction »
>
> **Matej Hladiš,** Institut de chimie de Nice (CNRS/université Côte d'Azur)

Néanmoins, début 2023, le chercheur a cosigné une étude montrant de nets progrès dus à une méthode particulière de l'apprentissage automatique : les réseaux de neurones en graphes (GNN). Fin août 2023, des chercheurs d'une start-up issue de Google Research, Osmo, et du centre Monell sur la chimie des sens (États-Unis) ont présenté dans *Science* des résultats issus de la même approche. Une donnée en graphe consiste en plusieurs variables (des nœuds) connectées entre elles par des liens *(lire l'encadré)*. Or, avec ses atomes et leurs liaisons chimiques, une molécule est une donnée particulièrement adaptée à un GNN.

L'odorat repose sur 400 récepteurs olfactifs, et chaque odorant (une molécule correspondant à une odeur) en active une combinaison (le code combinatoire des odeurs). Il existe 2,4 millions de paires de récepteurs olfactifs-odorants, mais seulement 46 700 ont été identifiées et décrites en laboratoire. L'Institut de chimie de Nice a donc entraîné un GNN avec 45 000 de ces paires, puis l'a testé avec le reste. Résultat ? Non seulement le modèle prédit mieux que d'autres approches quel odorant active quels récepteurs, mais il peut extrapoler et prédire le code combinatoire à partir de n'importe quelle molécule. *« Le modèle est encore limité par le volume et la qualité du jeu d'entraînement,* prévient Matej Hladiš. *Ses résultats sont donc meilleurs sur les récepteurs olfactifs les plus étudiés, mais dès qu'il y aura de nouvelles expériences de laboratoire, il gagnera en précision. »*

POUR EN SAVOIR PLUS

Sur le site du CNRS, les travaux de l'Institut de chimie de Nice sur les odeurs :
sciav.fr/926odeurs

La numérisation des odeurs reste un casse-tête

Le projet d'Osmo et du centre Monell vise plus directement à décrire une odeur perçue. L'équipe a puisé dans deux bases professionnelles 5000 molécules associées à des termes comme « acacia », « balsamique », « cassis », « tropical », « café brûlé », etc. pour entraîner un GNN. En parallèle, ont été sélectionnées 15 personnes capables de qualifier correctement un odorant, à l'aide d'un lexique de 55 mots à noter de 1 à 5. Puis humains et algorithme se sont vu soumettre les mêmes 323 odorants et leurs résultats ont été comparés.

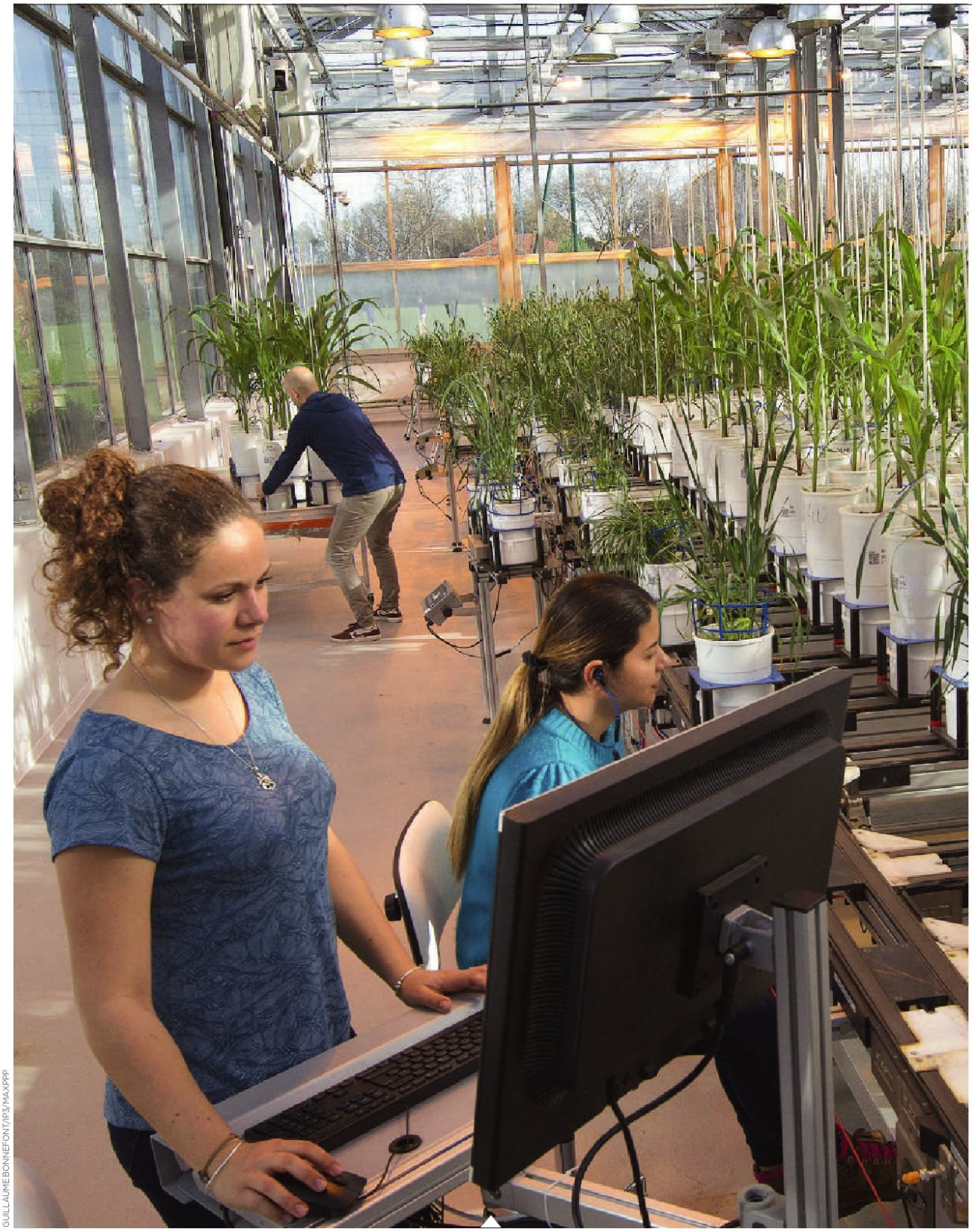
Pour un odorant donné, le GNN prédit mieux les termes descriptifs fournis en moyenne par les participants que chacun des participants eux-mêmes. Le modèle est aussi meilleur pour décrire 53 % des molécules que l'humain « médian » (celui qui est moins bon qu'une moitié du groupe mais meilleur que l'autre moitié). Ce genre de technologie pourrait par exemple servir à des parfumeurs qui auraient besoin de remplacer un composant tout en gardant la même senteur. *« Une IA pourrait facilement trouver les bons odorants parmi des milliers dans une liste, épargnant la tâche fastidieuse d'avoir à parcourir des catalogues »* imagine le chercheur Michael Schmuker, qui travaille sur des sujets similaires à l'université du Hertfordshire (Royaume-Uni). Mais la nature insaisissable des odeurs fait de leur numérisation un casse-tête encore loin d'être complètement résolu. *« Même si tous les composants chimiques d'une odeur sont identifiés, il reste très difficile de les combiner aux bonnes proportions. »* ■

Arnaud Devillard

LE MOT DU MOIS

GNN

Les articles de recherche sur les réseaux de neurones en graphes (GNN, pour graph neural networks) ont émergé au milieu des années 2000. Mais la méthode a vraiment décollé vers 2015-2016. Particulièrement approprié à des travaux sur les molécules (médicaments, matériaux, parfums), un graphe peut en fait représenter toute donnée consistant en plusieurs variables reliées. *« Par exemple, les nœuds peuvent être des villes et les liens peuvent montrer si des routes les connectent. Un GNN peut être entraîné sur des données présentées sous forme de graphe et apprendre à prédire d'autres propriétés de graphes »*, explique Alvaro Sanchez, chez Google. Ce chercheur a participé à l'élaboration de GraphCast, un GNN de prévision météo présenté fin 2023 (*lire* S. et A *n° 923, p. 18*). Dans ce projet, toute la surface de la Terre est représentée sous forme de graphe.



GUILLAUME BONNEFONT/IP3/MAXPPP

En analysant la réponse des plantes aux stress environnementaux (sécheresse, hautes températures…), les chercheurs de l'Inrae de Montpellier établissent quels sont les gènes les plus pertinents pour y faire face.

Nouveaux OGM
La révolution verte

L'assouplissement de la réglementation européenne sur les nouvelles techniques génomiques (NGT) pourrait permettre de produire des plantes plus résistantes à l'augmentation des températures, à la sécheresse, aux maladies et, donc, de réduire le recours aux pesticides et aux engrais. Mais la pertinence de ces outils génétiques plus ciblés que les classiques OGM fait encore débat chez les scientifiques.

Par Hugo Jalinière

« *En ces temps de crise climatique, de perte de biodiversité et de regain d'insécurité alimentaire, une approche scientifique fondée sur des preuves est essentielle à tous égards. Aujourd'hui plus que jamais, nous devons nous élever au-dessus de l'idéologie et du dogmatisme.* » C'est par ces mots que 37 prix Nobel et plus de 1500 scientifiques experts des techniques agricoles et de la génétique des plantes avaient choisi d'interpeller les membres du Parlement européen dans une lettre ouverte parue en janvier. L'enjeu ? Un vote imminent visant à assouplir la réglementation européenne sur les « nouveaux OGM ». Une expression désignant les « nouvelles techniques de sélection des plantes » (NBT) issues des « nouvelles techniques génomiques » (NGT).

Au contraire des OGM « traditionnels » obtenus par transgenèse ou mutagenèse aléatoire *(voir le tableau p. 40)*, ces NBT — ou NGT — reposent sur une innovation majeure : la découverte en 2012 d'un système d'édition génétique, CRISPR-Cas9, permettant de modifier, supprimer ou ajouter un gène choisi ; des « ciseaux moléculaires » précis, simples d'utilisation et peu coûteux. Une révolution pour les laboratoires du monde entier (biologie fondamentale, médecine ou modification des plantes) qui a valu le prix Nobel de chimie 2020 à ses découvreuses, la Française Emmanuelle Charpentier et l'Américaine Jennifer Doudna. Toutes ▸

deux signataires de la lettre au Parlement européen… qui a entendu l'appel! Le 7 février, les parlementaires ont en effet voté (307 voix pour, 263 contre et 41 abstentions) la décision d'extraire de la très restrictive réglementation européenne sur les OGM les NGT ayant subi au plus 20 modifications génétiques. « *C'est un petit pas, mais il est crucial,* se réjouit François Parcy, directeur de recherche en biologie végétale au CNRS et fervent partisan des NGT. *Cette limite tout à fait arbitraire de 20 mutations n'a pas vraiment de logique et il y aura des garde-fous au regard de la sensibilité du sujet en Europe. Mais c'est déjà un changement de paradigme majeur, puisque cela signifie qu'au lieu de rejeter par principe la technique, on évaluera au cas par cas ce que les modifications permettent de produire. Et, si la variété est vertueuse, de l'autoriser sans l'étiquette OGM.* »

Que seraient ces « variétés vertueuses », adaptées aux enjeux écologiques de ce siècle? La précision des nouveaux outils génétiques et les connaissances acquises ces vingt dernières années laissent libre cours à l'ingéniosité des chercheurs. Petit florilège de variétés créées en laboratoires publics comme privés grâce à CRISPR-Cas9 et présentées ces dix dernières années dans des revues scientifiques: du maïs moins gourmand en eau (2016), des pommes de terre résistantes au virus Y (2019), du blé résistant à la germination sur pied (2019), du riz supportant la salinité (2019), ou encore des peupliers avec une teneur en lignine réduite de moitié (2019) pour limiter les émissions carbone de la production de papier… De façon générale, l'idée est de rendre les cultures plus résistantes à l'augmentation des températures, au stress hydrique (sécheresse), aux maladies et, donc, de réduire le recours aux pesticides *(lire l'encadré p. 42)*.

Autre caractéristique porteuse: un captage du carbone plus efficace grâce à des racines renforcées. « *On ne sait pas encore comment, mais si nous parvenions à faire du blé pérenne, n'ayant pas besoin d'être replanté d'une année sur l'autre, cela permettrait la conservation des sols tout en favorisant une meilleure capture du CO_2 par un système racinaire mieux développé* », explique François Parcy. Le potentiel est tel qu'il est même permis d'espérer retrouver des tomates ayant du goût! *(Lire l'encadré ci-contre.)*

Mais l'enthousiasme pour ces NGT n'est pas partagé par tous, tant s'en faut. Il existe de fait un âpre débat sur leur pertinence. Au sein même de l'Institut national pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae), les avis divergent entre les « pro », les modérés ou les farouchement opposés. C'est dans cette dernière catégorie que se place Isabelle Goldringer, agronome généticienne et directrice de recherche à l'Inrae: « *Même avec CRISPR, tout n'est pas si simple et si rapide que certaines promesses le laissent croire. D'abord, il n'y en a pas tant que ça de gènes identifiés permettant la création de variétés avec des caractères très intéressants. Pour l'instant, on retrouve souvent des caractères simples, en particulier ceux de résistance aux herbicides* », précise la chercheuse. Dans le sous-texte: des variétés qui favo-

H. ASSOULINE/CNRS

« Au lieu de rejeter par principe la technique, on évaluera au cas par cas ce que les modifications permettent de produire »

François Parcy, directeur de recherche en biologie végétale au CNRS

Comment les variétés sont génétiquement modifiées

SÉLECTION ET HYBRIDATION « NATURELLE »	MUTAGENÈSE	TRANSGENÈSE (OGM)	NGT (NOUVELLES TECHNIQUES GÉNOMIQUES)
Deux lignées parentales sont croisées. Des dizaines voire des centaines de milliers de gènes sont affectés dans la descendance hybride obtenue. Cela concerne presque toutes les espèces.	Les variétés sont soumises à des mutagènes (rayons X ou gamma, herbicides, pesticides, etc.) pour provoquer des mutations aléatoires. Les variétés d'intérêt sont sélectionnées (riz, tournesol, poires…).	Des caractères génétiques identifiés dans une espèce sont transférés à une autre espèce pour obtenir une variété améliorée. Exemple le plus connu: le maïs MON 810, équipé d'un gène d'une bactérie insecticide.	Un système d'édition génétique (CRISPR, Talen, etc.) permet de supprimer, modifier ou ajouter un ou plusieurs gènes de façon sélective en fonction des caractéristiques recherchées dans la variété à créer.
Statut européen: Non régulé comme OGM, peut bénéficier du label « bio ».	**Statut européen:** Non régulé comme OGM, peut bénéficier du label « bio ».	**Statut européen:** Régulation stricte; en France, interdiction de culture depuis 2008.	**Statut européen:** Jusqu'à 20 modifications génétiques autorisées.

GÉNÉTIQUE

Pour retrouver le goût de la tomate

C'est un constat que les moins de 20 ans n'ont même pas le luxe de pouvoir faire : les tomates ont moins de goût qu'avant ! Une tristesse pour nos tables estivales dont elle est la reine. Un problème que connaît parfaitement Mathilde Causse, directrice de recherche à l'unité génétique et amélioration des fruits et légumes à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). Voilà vingt-cinq ans qu'elle travaille spécifiquement sur la tomate et ses plus de 3000 variétés pour environ 35 000 gènes chacune. *« Lorsque la sélection des variétés de tomate a été organisée à partir des années 1960, elle ne s'est pas préoccupée du goût »*, comme si celui-ci était inhérent à ce fruit originaire d'Amérique du Sud. *« Nombre de variétés ont été adaptées aux conditions de culture sous abri et avec moins de lumière ; or la chaleur et la lumière sont déterminantes pour le goût »*, résume Mathilde Causse.

Mais serait-il possible, à partir des connaissances acquises en génétique, de retrouver le goût des tomates d'antan ? Pas si simple… En 2020, la chercheuse a dirigé une vaste méta-analyse publiée dans *Nature Communications* pour mieux comprendre la génétique des composants du goût : taille, fermeté, saveurs, arômes, texture… L'analyse des informations issues de 775 variétés de tomates et plus de 2 millions de variations mineures du génome a mis en évidence 305 associations pour le contenu des fruits en sucres, acides, acides aminés et composés volatils liés aux arômes. En théorie, grâce à CRISPR, il serait donc possible de produire des plants pour répondre aux préférences de saveurs des consommateurs. Nombre de laboratoires dans le monde s'y attellent désormais.

« Mais on ne peut pas tout avoir ! La teneur en sucres et arômes est négativement liée au poids du fruit. Plus il est gros, et donc plein d'eau, plus les propriétés organoleptiques sont diluées, rappelle la chercheuse. *Quelle que soit la composition génétique de la variété, on n'aura jamais la même qualité en hiver, sous serre et avec moins d'ensoleillement, qu'en été. »* Sans compter qu'une bonne qualité est difficile à définir, puisque les préférences gustatives diffèrent d'un consommateur à l'autre.

Pour manger de bonnes tomates cet été, reste l'option de se tourner vers des variétés potagères anciennes, qui opèrent un retour en force ces dernières années. Et, surtout, ne jamais mettre ses tomates au froid. *« Il faut quand même que le consommateur sache que, peu importe la qualité de la tomate, si on la passe au réfrigérateur, elle perdra ses arômes ! »*, rappelle la chercheuse.

Plus de 300 variations dans le génome peuvent influencer les propriétés gustatives de la tomate. ►

CHRISTIAN VIDAL/BIOSPHOTO

risent plus l'agro-industrie que le climat et la biodiversité…
« *CRISPR est très pertinent pour accroître nos connaissances fondamentales en laboratoire,* concède-t-elle. *Mais en culture, c'est autre chose. L'outil est certes précis, mais dans les génomes, il y a beaucoup de redondances. De sorte qu'en ciblant une petite séquence, le système CRISPR peut aussi en modifier une autre non souhaitée parce qu'elle ressemble beaucoup à la cible d'origine.* » Un effet dit *off-target* — ou hors cible — qui peut toutefois être pris en compte en amont, « *en identifiant par exemple ces redondances pour les anticiper avant l'édition, puisqu'il est désormais facile de séquencer le génome* », pondère Mathilde Causse, elle aussi directrice de recherche Inrae, dans l'unité de recherche génétique et amélioration des fruits et légumes.
« *Il faut bien comprendre que les méthodes de croisements ou de mutagenèse aléatoire — qui ne sont pas régulées comme des OGM — introduisent plusieurs milliers à plusieurs millions de mutations dans le génome. Et que toutes ces plantes, génétiquement modifiées de fait, ont toujours été considérées sans risques sanitaire ou environnemental,* argumente de son côté François Parcy. *Grâce aux NGT, on sait introduire une poignée de variations à des endroits définis du génome. C'est toujours la même chose : insérer et sélectionner des mutations, mais de façon rapide et choisie, en se fondant sur des connaissances scientifiques. Par ailleurs, les plantes NGT seront toujours génétiquement bien plus proches de leurs parents que celles provenant de croisements ou mutées aux rayons X!* »

INRAE

Plants de tomates dont le gène eiF4E a été modifié par CRISPR pour leur conférer une résistance à un virus sans traitement.

Favoriser le mélange des variétés complémentaires

Mais permettraient-elles vraiment une meilleure adaptation au changement climatique ? « *Cet argument, c'est de l'intox,* fustige Isabelle Goldringer. *Le problème n'est pas de résister à une sécheresse ou à des augmentations de température qui vont se produire tous les ans au même moment. Il y a bien une tendance au réchauffement en moyenne. Mais ce qui affecte le plus les agriculteurs, ce sont les variations imprévisibles d'une saison à l'autre.* » Autrement dit, il faudrait chaque année avoir une semence NGT prête pour ce qui va venir… sans savoir précisément ce qui vient ! Les tenants de l'agroécologie paysanne plaident plutôt en faveur des mélanges de variétés complémentaires pour faire un peuplement au champ plus rustique, paré à tout. « *Ce ne sera peut-être pas le meilleur rendement pour l'agriculteur, mais ça évite la saison catastrophe,* précise l'agronome. *Aujourd'hui, en France, 20 % des surfaces de blé sont déjà cultivées avec des mélanges de variétés.* »
Pour François Parcy, « *les NGT interviennent tout à fait dans cette logique-là : il faut en effet diversifier au maximum les variétés vertueuses. Raison pour laquelle il faut une régulation faible, afin d'en créer le plus possible.* » C'est aussi l'avis rendu début mars de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation et de l'environnement (Anses) qui, bien que critique, valide l'idée d'évaluer au cas par cas l'intérêt des variétés créées, pour éventuellement les autoriser. « *Il faudra trancher la question de leur traçabilité,* précise le chercheur, *mais après cette bascule au niveau européen, je fais le pari que d'ici cinq à dix ans, nous aurons de nombreuses variétés NGT cultivées en France.* » Le rendez-vous est pris. ■

BIODIVERSITÉ

Vers un monde sans pesticides ?

C'est l'une des promesses les plus alléchantes portées par les nouvelles techniques génomiques (NGT) : une agriculture plus vertueuse pour la biodiversité. Grâce à des variétés plus résistantes aux maladies et aux nuisibles, il serait possible de diminuer le recours aux pesticides et autres intrants, qu'ils soient synthétiques ou naturels pour l'agriculture « bio ».
« *Quand on fera des pommes de terre qui n'auront pas besoin de traitements pour résister au mildiou, tout le monde sera bien content !,* lance François Parcy, directeur de recherche en biologie végétale au CNRS. *Pareil pour les vignes : quand on voit la quantité de sulfate de cuivre qu'on met sur les vignes, y compris en bio…* »
Mais attention : virus et bactéries mutent aussi très vite et sont éventuellement capables, dans une sorte de course évolutive, de contourner les résistances que les NGT auront introduites. Une capacité de contournement difficilement prévisible : elle peut se manifester en quelques récoltes, ou pas. Le virus de la mosaïque du tabac n'a toujours pas trouvé la solution au gène de résistance introduit il y a 50 ans.

CORINNE ROZOTTE / DIVERGENCE

Le pastoralisme diminue la faculté des racines des plantes à résister à l'érosion hydrique et éolienne.

Quand l'humain érode les montagnes

À partir de carottages effectués dans le lac du Bourget, des chercheurs de l'université Savoie Mont-Blanc ont pu faire la différence entre le rôle du climat et celui de l'activité humaine dans l'érosion des sols alpins. Dès l'âge du bronze, l'impact humain a été majeur.

C'est à une délicate recherche en responsabilités que se sont adonnés les chercheurs du laboratoire Environnements, dynamiques et territoires de montagne (Edytem, CNRS/université Savoie Mont-Blanc), en collaboration avec l'Institut de physique du globe. Qui des humains ou du climat sont le principal responsable de l'érosion des sols alpins ? À partir de carottages effectués dans les sédiments du lac du Bourget (Savoie) et d'échantillonnages dans ses deux principaux affluents (le Rhône et l'Arve), d'analyses des pollens et de résidus d'ADN anciens conservés dans des petits lacs de montagne et à l'aide d'une bonne dose de mathématiques, cette équipe est arrivée à un résultat stupéfiant que vient de publier *Nature Communications*: depuis 3800 ans, l'être humain est plus fort que le climat !

L'érosion est un phénomène continu qui altère les roches et lessive les sols, entraînés ensuite dans le réseau hydrographique. À l'échelle des 10 000 dernières années considérées par l'étude, elle a deux principaux moteurs. L'un est naturel : c'est le travail de l'eau, du vent, des glaces. L'autre est humain : c'est la

dégradation des sols par leur exploitation et leur mise à nu, qui accélèrent les causes naturelles. Ainsi, le défrichage d'arbres pour les cultures, le piétinement et le pâturage des troupeaux diminuent la faculté des racines des plantes à résister à l'érosion hydrique et éolienne. « *Un massif montagneux est un bon terrain d'observation car la topographie accélère les transports de matériaux et présente donc un taux d'érosion plus élevé et plus facile à mesurer* », explique William Rapuc, chercheur au laboratoire Edytem et à l'université de Durham (Royaume-Uni), l'un des auteurs de l'article. Réceptacle des 5000 km² d'un bassin-versant s'étendant du haut du mont Blanc à 4805,59 mètres jusqu'à 252 mètres d'altitude, le lac du Bourget accumule la mémoire de l'érosion par le ruissellement des pentes et les apports du Rhône et de l'Arve. Le point de départ de cette aventure, c'est donc cette plateforme de carottage qui, en juin 2018 et juin 2019 pendant un mois au total, en plein centre du lac et au droit de la confluence avec le Rhône, a prélevé par 145 mètres de fond 56,5 mètres de sédiments sous forme de carottes de 2 mètres de long. « *Cela correspond à environ 10 000 ans de dépôts* », précise William Rapuc.

Deux parties ont été définies, avec et sans activité humaine

Il est impossible à partir de ce seul élément de faire la différence entre l'érosion d'origine climatique et celle causée par l'humain. Mais les chercheurs ont eu l'idée de découper le bassin-versant du lac du Bourget en deux parties. Une première où les activités humaines n'ont pas eu d'effet sur l'érosion, qui peut donc être considérée comme dépendante entièrement de l'effet des précipitations, du vent, et des avancées/retraits des glaciers. Cette région représente la partie englacée du massif du Mont-Blanc, au-delà de 2300 mètres et jusqu'au sommet. L'autre partie correspond au reste du bassin-versant, où le climat et les activités humaines ont pu influencer l'érosion au cours du temps.

Dans cette région non englacée, trois zones ont été définies : la plaine entre 250 et 850 mètres, la moyenne montagne entre 850 et 2000 mètres et la haute montagne au-delà de 2000 mètres — altitudes les plus hautes où de l'activité humaine ancienne a été détectée. L'idée a donc été de comparer les zones non englacées qui ont connu les activités humaines avec les régions englacées des sommets. « *Pour cela, nous avons mesuré la composition isotopique en néodyme des sédiments du lac du Bourget et réalisé un modèle permettant de connaître la contribution des deux régions — englacée et non englacée — du bassin-versant au cours du temps* », explique William Rapuc.

Dans un premier temps, les chercheurs ont appliqué les vitesses d'érosion de

CONSÉQUENCES

Une menace pour la production agricole

Phénomène naturel, l'érosion des sols est fortement aggravée par l'action humaine. 75 % des terres non couvertes de glaces ont été affectées, principalement par l'agriculture et la déforestation qui met des sols fragiles à nu. Selon le Giec, depuis 1961, la production de nourriture par personne a augmenté d'un tiers, la consommation de légumes, huile et viande a doublé. Sur la même période, l'usage des engrais chimiques a été multiplié par 9 et il y a eu deux fois plus de surfaces irriguées. Or, cette exploitation est trop intensive et dégrade les sols, affirme un rapport de la FAO de 2019 qui prévient que d'ici à 2050, l'érosion pourrait provoquer la perte de 75 milliards de tonnes de sol, entraînant une diminution de 10 % de la production agricole. Une évaluation du Centre commun de recherche (JRC) de l'Union européenne, effectuée en 2019 sur les 26 États membres, montre que le seul travail de la pluie provoque une perte de 2,6 tonnes de couche superficielle par hectare et par an, soit 970 millions de tonnes par an. 12,7 % des sols perdent plus de 5 tonnes par an et devraient être prioritairement protégés. Ce sont principalement des terres exploitées intensivement. Pourtant, les sols fournissent des services cruciaux. Outre la production alimentaire, ils stockent autour de 2000 milliards de tonnes de carbone pour la planète entière. Mieux gérés, ils pourraient retirer tous les ans de l'atmosphère 34 % des émissions humaines de CO_2 responsables du changement climatique.

WOUTER PATTYN / NATURIMAGES

Les terres qui abritent des cultures intensives sont les plus fragilisées par l'érosion.

WILLIAM RAPUC

Des carottages de sédiments accumulés depuis environ 10 000 ans dans le fond du lac du Bourget (Savoie) ont été effectués par les chercheurs du laboratoire Edytem.

la zone englacée à celles des zones inférieures. Ils ont pu ainsi construire une courbe théorique d'érosion où ne seraient intervenus que les effets du climat. Puis ils ont comparé cette courbe avec ce que leur révélait l'analyse des sédiments du lac. *« Et là, nous avons constaté un écart très conséquent entre la courbe théorique d'érosion naturelle et ce qui était réellement advenu,* poursuit William Rapuc. *Depuis 3800 ans, l'érosion augmente à une vitesse deux fois supérieure à notre courbe théorique. Nous avons ainsi pu mesurer l'ampleur de l'action humaine sur le milieu.* » Une érosion deux fois plus intense signe en effet un impact fort sur l'écosystème montagnard, alors que le nombre d'habitants et la taille de leurs troupeaux étaient vraisemblablement très faibles à l'époque.

Dans des travaux antérieurs, le laboratoire Edytem avait reconstitué l'évolution de l'occupation humaine dans la région. À partir de l'ADN prélevé dans des carottes de sédiments des lacs de montagne (comme Anterne, Verney, Savine), les chercheurs ont pu retracer la présence de troupeaux dès l'âge du bronze, tandis que des pollens anciens de plantin, de céréales et d'arbres fruitiers signent l'arrivée de l'agriculture. Et c'est dans la haute montagne, au-dessus de 2000 mètres, que l'on trouve en premier ces traces. *« Les humains sont d'abord montés très haut pour développer leur activité, parce qu'à ces altitudes, il est plus facile de défricher et d'ouvrir les espaces pour faire paître des troupeaux* », assure William Rapuc. Ils sont ainsi restés dans cet étage de haute altitude, jusqu'à la chute de l'Empire romain, où la vitesse d'érosion décroît fortement. À partir du Moyen Âge, ce sont les zones de moyenne altitude et de plaine qui commencent à être plus massivement utilisées. Les taux d'érosion amorcent leur décroissance à la fin du petit âge glaciaire, vers 1750. L'exode rural commence. Les habitants désertent les hautes vallées du massif. La végétation reprend ses droits. Les arbres reconquièrent les pentes. Une évolution toujours en cours.

L'anthropocène aurait débuté bien avant le XIXe siècle

Avec ces nouveaux résultats, le laboratoire Edytem vient aussi éclairer nos connaissances sur la « zone critique », cet espace de quelques centaines de mètres entre les premières couches de l'atmosphère et la composition géologique des sols et leurs nappes phréatiques. Là où se concentre la vie. Le sol et son érosion sont des sujets centraux de ce nouveau domaine de recherche : ils sont des acteurs essentiels des grands cycles géochimiques (carbone, phosphore, azote) et le substrat qui permet aux plantes de pousser et aux animaux (dont les humains) de se nourrir.

Depuis quelques décennies, l'action des humains sur leur milieu vital est questionnée, notamment pour les effets destructeurs de leurs activités. Depuis le début des années 2000, le monde scientifique estime ainsi que la Terre a changé d'ère géologique, quittant l'holocène pour entrer dans l'anthropocène. Mais les auteurs de l'article pensent que ce changement d'ère serait bien plus ancien que la révolution industrielle du XIXe siècle. Il y a 3800 ans, déjà, *Homo sapiens* modifiait profondément son milieu. ■ **Loïc Chauveau**

JULIA GARAGNON

« Depuis 3800 ans, l'érosion augmente à une vitesse deux fois supérieure à notre courbe théorique »

William Rapuc, chercheur au laboratoire Edytem de l'université Savoie Mont-Blanc et à l'université de Durham (Royaume-Uni)

VALÉRIE CHANSIGAUD
HISTORIENNE DES SCIENCES ET DE L'ENVIRONNEMENT

« Le végétarisme est un marqueur d'appartenance à une élite »

Dans son dernier ouvrage, Valérie Chansigaud explore les rouages qui ont mené à un désamour des plus aisés à l'égard de ce qui fut un marqueur de la réussite sociale : la consommation de viande. Un aliment fragilisé par les crises sanitaires et les scandales liés à la maltraitance animale.

Votre « Histoire du végétarisme » démarre avec la préhistoire : pourquoi remonter aussi loin ?
J'ai souvent constaté qu'un objet de recherche qui m'apparaissait bien délimité chronologiquement obligeait finalement à poser la question des origines et à remonter l'enquête vers des éléments encore mystérieux, malgré les considérables progrès des connaissances. J'entends par là nos origines, et plus précisément la phase où nous nous sommes différenciés de nos ancêtres grands singes, puis de Neandertal. Cette passion pour la consommation d'animaux semble pouvoir être pensée comme propre uniquement à *Homo sapiens*.

Qu'est-ce qui validerait cette thèse ?
Entre autres, l'exemple des représentations rupestres, où figurent presque exclusivement de grands mammifères, les végétaux y apparaissant de façon très marginale — et encore, pas en Europe. Il est significatif de relever la constante valorisation de ces animaux dans des régions du monde et à des époques différentes. On pourrait en conclure que ces peintures ne sont pas la création d'une seule et même tribu qui se serait déplacée, mais bien de plusieurs qui ont évolué indépendamment les unes des autres, partageant une sorte d'obsession pour la viande, à une époque où le végétarisme, entendu comme le refus volontaire de manger des animaux, n'existait pas.

AGNES HAUCK

BIO EXPRESS

- **1961** Naissance le 29 mars à Lyon.
- **1997** DEA environnement, temps, espace et société, université d'Orléans, MNHN.
- **1997** Doctorat en environnement, université d'Orléans, IRD.
- **2012** Rejoint le laboratoire Sphère (Paris Diderot-CNRS) en tant que chercheuse associée.
- **2020** Parution *d'Histoire de la domestication animale* (Delachaux et Niestlé).
- **2023** Parution *d'Histoire du végétarisme* (Buchet-Chastel).

Ce terme de végétarisme, quand émerge-t-il ?
Pendant longtemps, pour désigner cette pratique on a employé des ellipses, des métaphores. Jusqu'au XVIII[e] siècle on parlait de régime pythagoricien en se référant à la figure quasiment mythique de Pythagore, qui en aurait été un adepte. En français, avant que le terme n'apparaisse en 1873 et ne s'installe, grâce notamment à l'influence de l'association anglaise Vegetarian Society, on utilisait le joli mot de légumiste ! Il désignait le fait de s'abstenir délibérément de consommer des animaux. Il est important de souligner ce refus volontaire car beaucoup de formes de végétarisme sont subies, soit parce qu'une partie des populations, notamment rurales, sont trop pauvres pour avoir accès à la viande, soit parce que certaines catégories en sont exclues — telles les femmes chez beaucoup de peuples, riches ou pauvres, européens ou pas.

PLAINPICTURE

Moins de 2 % des individus seraient végétaliens ou végans en France, excluant totalement la viande de leur consommation.

En effet, vous faites un lien entre l'histoire de la viande et des questions de domination, de privilèges de classe et de genre…
Si l'on étudie — sans même se soucier du végétarisme — la consommation d'animaux dans les sociétés agricoles, qu'elles soient asiatiques ou européennes, on constate que depuis l'Antiquité, sa répartition est inégalitaire, qu'il s'agisse d'espèces sauvages ou domestiques. Malgré d'infinies variations locales temporaires, l'essentiel des animaux disponibles est globalement consommé par les élites, et au sein même de ces élites, par les hommes en particulier. Cela est tellement ancré dans ces sociétés que, par exemple, dans la Chine antique, on dénomme les responsables des provinces des mangeurs de viande : le rang est défini par le fait d'en consommer.

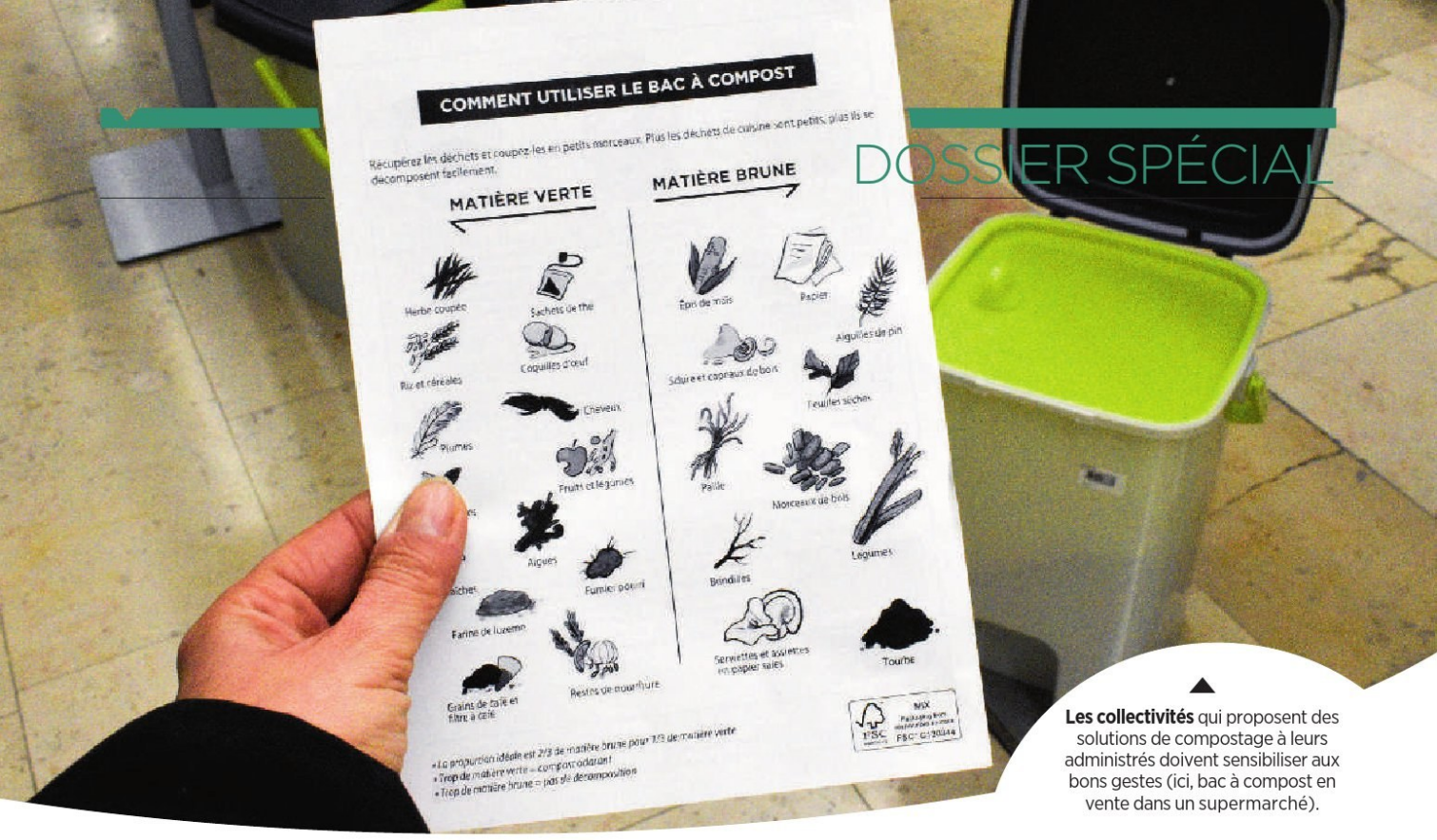
D'après vous, cela a bien changé…
Ah, ça, c'est un phénomène fascinant ! Nous sommes confrontés à un changement inédit dans l'histoire : aujourd'hui dans les pays riches, les classes les plus aisées mangent moins de viande que les classes les plus pauvres. D'ailleurs, les individus appartenant aux classes les plus riches sont moins gros que ceux issus des classes les plus pauvres. Pour la première fois, l'inégalité observée de tous temps au sein des sociétés agricoles s'est renversée. Et ce phénomène unique est caractéristique de tous les pays riches.

Mais quels ressorts incitent au végétarisme ?
On pourrait évoquer quantité de motivations individuelles — s'inquiéter du bien-être des animaux, de la préservation de la planète, de sa propre santé, de questions économiques —, mais la dimension symbolique a dans ce choix une place plus importante que tout le reste. Ce n'est pas un hasard si l'on assiste aujourd'hui à un désamour des plus aisés à l'égard de ce qui fut un marqueur de la réussite sociale, car ce marqueur est dévalorisé, il faut le remplacer. Maladie de la vache folle, grippe aviaire, arnaques aux viandes de mauvaise qualité ou scandales éthiques autour de la maltraitance animale ont fragilisé cet aliment. Désormais, on se distingue en renonçant à la consommation de viande. C'est, dans les pays riches, le nouveau marqueur de l'appartenance à une élite.

Cela soulève des débats enflammés dans la société. Pourquoi ?
Parce que la viande, et l'alimentation en général, joue un rôle bien éloigné du simple fait de se nourrir. Au même titre que la sexualité ou le langage, la viande permet de se bâtir une identité, de se structurer dans un rapport aux autres en s'affirmant en tant que nous par rapport à eux. Manger, c'est obéir à des règles. Les remettre en question avec ses considérations éthiques, ses exigences hygiéniques ou écologiques, en imposant ses préférences alimentaires, c'est bousculer les repères établis, renverser un ordre social où le repas est quasiment l'égal d'une messe. Voilà qui explique les réactions violentes dont les végétariens font souvent l'objet.

Mais la consommation de viande a-t-elle réellement baissé en France ?
Entre 1960 et 1980, elle n'avait fait qu'augmenter avant d'atteindre un plateau, puis de décroître. Aujourd'hui, cette consommation est en diminution, se situant à peu près au niveau des années 1970, soit autour de 85 kg annuels par habitant. Mais il ne faut pas se tromper : cette réduction ne traduit pas une transformation radicale de la société, à peine une inflexion. Entre les 6 à 7 % d'individus qui se déclarent végétariens tout en flottant dans des pratiques qui n'excluent pas totalement la viande, et les probablement moins de 2 % de végétaliens et végans — qui bannissent de leur alimentation tout aliment d'origine animale, voire tout dérivé animal non alimentaire —, nous restons bien loin de la révolution ! ■

Propos recueillis par Andreina De Bei



MAGALI COHEN / HANS LUCAS VIA AFP

Les collectivités qui proposent des solutions de compostage à leurs administrés doivent sensibiliser aux bons gestes (ici, bac à compost en vente dans un supermarché).

Biodéchets

5 questions pour comprendre ce qui change

Depuis le 1er janvier, tous les biodéchets, notamment alimentaires, doivent être triés à la source et valorisés. Mais, pour les particuliers, retards et malentendus freinent la mise en place du dispositif.

Par Christine Taconnet, avec Agence Forum News

1 Qu'impose vraiment la loi ?

Pas d'amende, pas de police des poubelles : composter n'est pas devenu obligatoire ! La loi du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (dite loi Agec) prévoit bien la généralisation du tri à la source des biodéchets depuis janvier. Mais c'est aux collectivités que s'applique l'obligation de fournir une solution à leurs habitants. Objectif : réduire et valoriser cette matière organique, qui représente un tiers de nos ordures ménagères selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), plutôt que de la mettre en décharge ou de l'incinérer. Certaines communes ont opté pour la « tarification incitative » d'enlèvement des ordures ménagères, une mesure instaurée par la loi de transition énergétique pour la croissance verte de 2015, qui a vocation à la généraliser. Concrètement, *« chaque foyer a un forfait de levées de poubelles (sacs noirs) par an. Les particuliers qui le dépasseraient, s'ils ne trient pas leurs biodéchets par exemple, paient un supplément »*, résume Cécile Bussière, chargée du plaidoyer du Réseau compost citoyen (qui fédère de nombreux acteurs en France), partisan du dispositif.

2 Quelles sont les solutions de collecte existantes pour les ménages ?

Dans de nombreux territoires, le tri des déchets verts (du jardin) existe déjà, soit par collecte à domicile, soit par apport en déchetterie. Il restait donc à sortir les restes de repas et autres épluchures des sacs-poubelle. Plusieurs solutions ont vu le jour. Le compostage domestique, pratique ancienne dans les maisons, les lombricomposteurs, adaptés aux appartements, ou les composteurs partagés. Ils ont l'avantage de la solution locale, puisque l'engrais produit grâce aux déchets alentour est utilisé sur place. Le Grand Poitiers a misé sur ce compostage de proximité, en déployant des bacs publics et en distribuant des composteurs de 400 litres à toutes les maisons avec jardin. Les collectivités peuvent aussi organiser une collecte en porte à porte. Dans ce cas, les ménages sont équipés d'un bac dédié et bénéficient d'un service de ramassage au moins hebdomadaire. Dernière option : les collectivités installent partout dans l'espace public des bornes d'apport volontaires, similaires à celles qui existent déjà pour

Les voyages du SAVOIR
SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

L'art rupestre à livre ouvert

LE SITE ARCHÉOLOGIQUE DE FOZ CÔA au Portugal

Avec Jean-Michel Geneste et Philippe Pajot

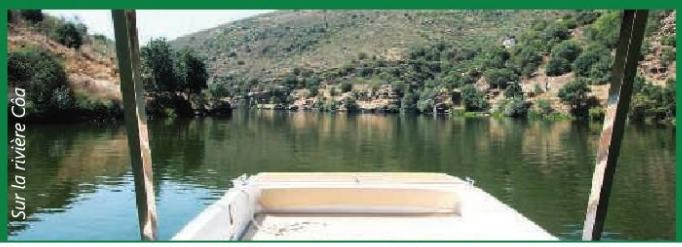
Du 10 au 15 septembre 2024

Le Douro à Vila Nova Foz de Côa

Les sites d'art rupestre préhistorique de la vallée de Côa se trouvent sur les berges escarpées de la rivière Côa, affluent du Douro. Des chasseurs-cueilleurs ont gravé sur des roches des milliers de figures animales durant plusieurs millénaires. C'est à retrouver et décrypter ces gravures que s'emploient des chercheurs archéologues depuis 1996.

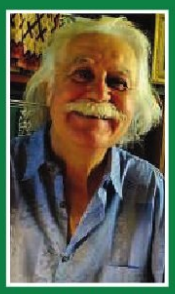
Cada do inferno

En petits groupes, pour une meilleure qualité des visites, nous irons à la découverte de ces gravures millénaires, parfois difficiles à lire mais nos guides nous y aideront. Comprendre, interpréter et comparer ces expressions artistiques sera aussi l'objectif des conférences de Jean-Michel Geneste.



Sur la rivière Côa

Au programme : Visites de Porto, Braga, Guimarães, parc archéologique de Foz Côa, Pinhao, Vila Real. En pension complète.
5 nuits / 6 jours de Porto à Porto 1.950 € par personne en pension complète.



JEAN-MICHEL GENESTE
Archéologue,
Conservateur général
du patrimoine

PHILIPPE PAJOT
Rédacteur en chef
de *La Recherche*

THIERRY AUBRY

Rencontre avec les archéologues **Thierry Aubry** et **Luis Luis** en charge des fouilles et des études sur le site de Foz Côa.

LUIS LUIS

Les sites d'art rupestre préhistorique de la vallée de Côa se trouvent sur les berges escarpées de la rivière Côa, un affluent du Douro. Ils témoignent d'une occupation humaine importante et continue depuis la fin du paléolithique. Les grottes n'ont pas l'apanage de l'art rupestre. Ici, sur des centaines de parois ont été gravées par des humains, hommes, femmes et peut-être enfants, durant plusieurs millénaires, des milliers de figures animales présentant l'ensemble d'art paléolithique en plein air le plus important d'Europe et le plus remarquable de la péninsule Ibérique. Mais pour en savoir plus, pourquoi ? comment ? écoutons Jean-Michel Geneste qui nous accompagnera dans cette découverte, et ses collègues archéologues qui nous accueilleront !

Mais cette région du Haut Douro n'est pas seulement riche en vestiges de la préhistoire. Elle réserve aussi de très belles surprises en matière de paysages, de monuments, d'azulejos de découvertes touristIques, sans parler du vin de Porto qui a là ses vraies racines, comme le fado ! Et c'est une des caractéristiques des *Voyages du Savoir* que d'allier le sérieux de la découverte scientifique aux plaisirs du tourisme culturel !

Organisation technique
BLB TOURISME

PROGRAMME, RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
blb-tourisme.bzh/voyages-du-savoir
Ou scannez

BLB TOURISME Zone de KERBOIS 15, Rue Yves de Kerguelen 56400 AURAY
Tél : 02 97 56 60 86 Courriel : inscription@blb-tourisme.com

La valorisation des biodéchets permet de fabriquer de l'engrais ou du biogaz.

DAMIEN MEYER - AFP

AVIS D'EXPERT

ANTOINE GUILLOU

ADJOINT À LA MAIRIE DE PARIS EN CHARGE, NOTAMMENT, DE LA RÉDUCTION DES DÉCHETS

« 100 % des Parisiens pourront bientôt gérer leurs biodéchets »

Paris est une métropole très dense, où l'installation de composteurs peut être complexe. Où en est la collecte des déchets alimentaires ?

On compte aujourd'hui plus de 1000 composteurs collectifs à Paris et nous continuons à les encourager. Nous avons également testé dès 2017 la collecte en porte à porte, dans trois arrondissements. Mais le tonnage était faible : 3 kilogrammes collectés par an et par habitant en 2022… *A contrario*, les premiers points d'apports volontaires testés et les 200 bornes de collecte sur les 70 marchés parisiens, installées à partir de 2020, fonctionnent très bien. La qualité du tri est plutôt bonne.

JOSÉPHINE BRUEDER / VILLE DE PARIS

Comment répondez-vous à la nouvelle obligation de tri à la source des déchets alimentaires ?

Nous allons généraliser les points d'apports volontaires. Toutes les stations de tri dans l'espace public (Trilib') seront dotées d'un module pour les déchets alimentaires. À la fin de cet été, en comptant les marchés, il y aura une borne à trois minutes à pied de chaque Parisien. Ce qui permettra de couvrir 100 % de la population.

Comment sont valorisés ces biodéchets ?

Le Syctom, service métropolitain de traitement des déchets ménagers, les collecte et les répartit dans un méthaniseur, qui produit du gaz renouvelable. Pour une valorisation de proximité, un nouveau méthaniseur, d'une capacité de traitement de 50 000 tonnes, entrera en service à Gennevilliers (Hauts-de-Seine) en 2025. ■

Propos recueillis par C. T.

le verre ou les emballages. Les particuliers y déposent eux-mêmes leurs déchets alimentaires (à l'aide de bioseaux ou de sacs en papier recyclable). C'est une proposition plus urbaine, celle qu'a choisie Paris *(lire l'interview ci-contre)*. Dans tous les cas, *« la sensibilisation des habitants est un enjeu fort, pour que les consignes soient comprises et le geste adopté »*, explique Muriel Bruschet, référente biodéchets à la direction économie circulaire de l'Ademe.

3 Pourquoi la collecte des biodéchets a-t-elle pris tant de retard ?

Selon l'Ademe, en décembre 2023, seuls 30 % de la population disposaient d'une solution de tri. Ce chiffre atteindra péniblement 40 % cette année. Première difficulté : *« La loi ne comporte pas d'indicateurs permettant de définir à partir de quand une collectivité a mis en place un service suffisant »*, pointe Muriel Bruschet. Pas de contraintes non plus. Par ailleurs, en 2023, certaines collectivités ont dû gérer l'extension des consignes de tri des emballages, qui harmonise les pratiques au niveau national pour les poubelles jaunes, et donc adapter leur service public de gestion des déchets (SPGD), voire leur centre de tri. Difficile de s'occuper des biodéchets en même temps ! *« Il s'agit d'un nouveau flux dans la SPGD, ce qui a un coût »*, rappelle Muriel Bruschet. L'Ademe estime ce surcoût entre 7 et 20 euros annuels par habitant selon la solution adoptée. D'où la mise en place de subventions.

4 Que deviennent les déchets alimentaires triés ?

La valorisation des biodéchets prend deux formes. Première technique, le compostage, qui les transforme en engrais riche, fertilise cultures et jardins. *« Cet apport organique permet également aux sols de retenir l'eau, ce qui devient crucial avec la hausse des températures. Il remplace bien sûr les intrants chimiques, mais aussi les engrais organiques, qui sont souvent importés. Au final, c'est un pilier de la souveraineté alimentaire »*, précise Muriel Bruschet. L'autre filière consiste à acheminer les biodéchets, notamment ceux qui sont récoltés dans les bornes d'apport volontaire, vers des méthaniseurs, qui les transforment en biogaz. Cette énergie renouvelable est alors réinjectée dans les réseaux de distribution. Les méthaniseurs produisent aussi un digestat qui sert de fertilisant agricole.

5 Ma collectivité m'a donné un bac à compost. Comment m'y prendre efficacement ?

Les novices en compostage ont tout entendu : qu'il ne faudrait jeter ni agrumes, ni épluchures d'oignons, etc. Cécile Bussière se veut rassurante : *« Tous les déchets de cuisine et de table sont compostables ! »* À condition d'avoir la main légère sur les produits carnés (gare aux mauvaises odeurs) ou l'ail, vermifuge. Les coquilles d'huîtres ? En petites quantités et broyées. L'important est de respecter trois règles de base. Équilibrer l'apport de déchets humides et de matières sèches (paille, branches broyées et feuilles mortes, morceaux de cartons bruts) pour générer un bon rapport entre l'azote et le carbone et éviter le pourrissement. Fragmenter les déchets, ce qui aide leur décomposition. Enfin, brasser régulièrement, pour que l'air pénètre. Les lombricomposteurs, en revanche, sont d'un usage un peu plus délicat. ■

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

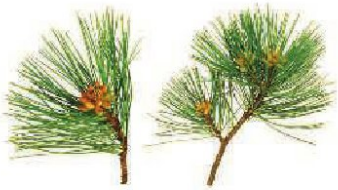
Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

Indispensable irrigation

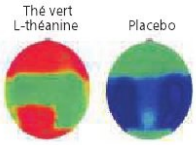


Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 84 25 91 08** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 et 120 cp sont disponibles grâce aux codes **ACL 295 18 63** et **636 08 99**

Comment vaincre l'insomnie

La mauvaise qualité du sommeil perturbe la vie de millions de Français. Mais ce fléau n'est pas une fatalité. Les recherches en neurologie ont considérablement progressé et un nouveau type de somnifère réduit même les risques d'accoutumance. Pour les insomnies chroniques, les thérapies comportementales et cognitives ont démontré leur efficacité.

Dossier réalisé par
Franck Daninos et
Coralie Lemke

ÉTAT DES LIEUX
Un enjeu de santé publique
p. 54

MÉDICAMENTS
Des somnifères plus efficaces
p. 56

TECHNIQUE
Les bienfaits des thérapies cognitives
p. 61

IDÉES REÇUES
Nos conseils pour retrouver le sommeil
p. 64

JANIECBROS/GETTY IMAGES

37 % des Français se sont déclarés insatisfaits de la qualité de leurs nuits lors d'une enquête de l'Institut national du sommeil et de la vigilance en 2023.

Un enjeu majeur de santé publique

15 à 20 % de la population française serait concernée par des problèmes d'insomnie. En plus de dégrader la qualité de vie, les dettes répétées de sommeil augmentent les risques de nombreuses maladies et affaiblissent les défenses immunitaires. Heureusement, la prise en charge médicale s'affine.

Vous arrive-t-il de ruminer pendant des heures dans votre lit avant de tomber dans les bras de Morphée? De vous réveiller en pleine nuit — ou trop tôt le matin — sans retrouver le sommeil? Avec des conséquences parfois désastreuses sur vos journées, surtout quand les mauvaises nuits reviennent inlassablement et s'enchaînent: fatigue permanente et sentiment de découragement, troubles de l'humeur et difficultés à se concentrer, vague d'angoisse, etc. Un véritable enfer en somme… qui dure peut-être depuis plusieurs semaines ou même des années. Ce mal ronge des millions de personnes. En 2023, une enquête de l'Institut national du sommeil et de la vigilance (INSV) révélait que 37 % des Français n'étaient pas satisfaits de la qualité de leurs nuits. Selon l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), les problèmes d'insomnie concerneraient 15 à 20 % de la population, 9 % endurant une forme chronique et sévère. C'est *« un enjeu majeur de santé publique »*, relève Jonathan Taïeb, médecin attaché au Centre du sommeil et de la vigilance à l'Hôtel-Dieu et fondateur de l'Institut médical du sommeil, à Paris. Car au-delà d'une dégradation de la qualité de vie, *« les dettes répétées de sommeil augmentent les risques de maladies cardio-vasculaires, métaboliques ou d'AVC et affaiblissent les défenses immunitaires »*, souligne-t-il. Sans compter l'impact économique associé à l'absentéisme, aux baisses de productivité et aux accidents du travail.

Distinguer les insomnies aiguës et chroniques

Ce fléau n'est pourtant pas une fatalité. *« Les connaissances sur le sommeil et ses pathologies ont considérablement progressé ces dernières décennies »*, observe Marc Rey, neurologue et président de l'INSV. Pour être efficaces, les prises en charge médicales doivent néanmoins reposer sur un diagnostic solide. Point de départ: distinguer les insomnies aiguës et chroniques. Les premières résultent d'un comportement (repas copieux, excitants), d'un environnement défavorable (lumière excessive, bruit) ou d'une situation perturbante (problèmes de vie, événement familial…). Elles ne durent que peu de temps, disparaissant généralement avec la cause qui les a engendrées. Une meilleure hygiène de sommeil sera aussi rapidement profitable. Car bien dormir s'apprend (ou se réapprend): se lever à heure fixe, éviter les écrans une heure avant le coucher, ne pas surchauffer sa chambre, etc. Nous détaillons dans ce dossier les pratiques les plus efficaces à l'aune des dernières

ENQUÊTE

Sommeil et santé mentale

Selon une enquête récente de l'INSV, la durée moyenne de sommeil continue de se réduire en France. Elle est de 6 h 58 min en semaine, un chiffre stable depuis 2019 (6 h 57 min). Mais elle a diminué de 34 minutes pendant les week-ends et congés (7 h 40 min, contre 8 h 14 min il y a cinq ans). Ce raccourcissement des nuits n'est pas intentionnel. *« Il semble résulter, plutôt, d'une dégradation de la santé mentale depuis l'épidémie de Covid-19, exacerbée par les inquiétudes économiques, les conflits actuels ou l'éco-anxiété »*, analyse Marc Rey, président de l'INSV. Car les troubles du sommeil et anxiodépressifs s'alimentent et sont intimement corrélés. Selon l'INSV, 31 % de la population souffre actuellement d'anxiété, 15 % de dépression. Or, 35 % des personnes anxieuses et 30 % des personnes dépressives sont touchées par l'insomnie. Et parmi les insomniaques, plus de la moitié souffre d'anxiété et environ un quart de dépression.

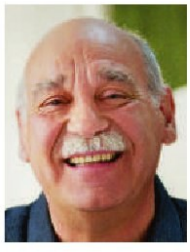
La polysomnographie enregistre différents paramètres physiologiques pendant le sommeil et permet de détecter d'éventuelles pathologies, comme l'apnée du sommeil, en cause dans certaines insomnies.

BURGER/PHANIE

recherches *(lire p. 64)*. Si elles ne suffisent pas, un traitement pharmacologique pourra s'avérer nécessaire, pour passer un cap difficile notamment. Il existe à cette fin de nombreux « hypnotiques », de la famille des benzodiazépines en particulier, massivement consommées en France *(lire p. 59)*. Mais ces somnifères présentent des risques importants d'accoutumance, d'addiction et de nombreux effets secondaires. *« Ils doivent donc être utilisés le moins possible et sur une courte période »*, insiste Jonathan Taïeb.

Les insomnies deviennent chroniques lorsque les symptômes persistent depuis plus de trois mois et se manifestent au moins trois fois par semaine. Ce sont elles qui sont les plus problématiques, car elles peuvent affecter sévèrement la vie quotidienne tout comme l'état de santé. Il faudra discerner cependant les affections « primaires », alimentées par le stress, l'angoisse de ne pas dormir ou des conditionnements progressifs, et « secondaires » (40 % des cas environ), suscitées potentiellement par une variété de pathologies. Parmi elles : les troubles mentaux, l'apnée du sommeil, le syndrome des jambes sans repos, la narcolepsie, l'hyperthyroïdie, etc. *« Un traitement spécifique sera alors nécessaire,* souligne Jonathan Taïeb. *C'est grâce à des questionnaires, un enregistrement du sommeil ou d'autres examens médicaux qu'un diagnostic précis sera établi. »*

Pour soigner une insomnie chronique, qu'elle s'accompagne ou non de comorbidités, les thérapies comportementales et cognitives (TCC) constituent aujourd'hui le traitement de référence pour la Haute Autorité de santé. Les patients apprennent alors à sortir du cercle vicieux dans lequel ils sont enfermés, en modifiant leurs comportements et pensées sur le sommeil. Sur le long terme, elles sont plus efficaces que n'importe quel médicament. *« Jusqu'à il y a quatre ou cinq ans, les TCC étaient confidentielles en France, pratiquées seulement dans quelques hôpitaux et inconnues d'une majorité de médecins généralistes »*, regrette Marc Rey. On observe désormais une diffusion plus large de ces thérapies, que *Sciences et Avenir* a pu expérimenter *(lire p. 61)*. Selon les circonstances et sur de courtes durées, les TCC peuvent néanmoins être associées à des somnifères. Ce sera notamment le cas du Quviviq, nouveau type de médicament disponible en France depuis quelques semaines. Contrairement aux autres hypnotiques, il n'agit pas sur l'endormissement mais sur l'état d'éveil, avec beaucoup moins de risques d'accoutumance et d'effets secondaires. C'est *« une innovation importante »*, s'enthousiasme Jonathan Taïeb : une nouvelle arme thérapeutique pour aider les patients à retrouver le chemin du sommeil, que nous présentons en détail dans les pages qui viennent. ■ **F. D.**



INSV

« Les connaissances sur le sommeil et ses pathologies ont considérablement progressé ces dernières décennies »

Marc Rey, neurologue et président de l'Institut national du sommeil et de la vigilance

Les somnifères gagnent en efficacité

Disponible sur prescription médicale, le Quviviq est un médicament d'un nouveau genre. Contrairement aux benzodiazépines et autres hypnotiques visant à soulager la détresse des insomniaques, ce « coupeur d'éveil » respecte les phases de sommeil profond et réduit les risques d'accoutumance.

« *Cela faisait près de quarante ans que le traitement pharmacologique de l'insomnie n'avait pas connu pareille innovation !* » C'est avec un enthousiasme non dissimulé que la psychiatre Sylvie Royant-Parola, présidente d'honneur du réseau de santé Morphée, spécialisé dans les troubles du sommeil, accueille le Quviviq, un nouveau genre de somnifère disponible depuis le mois de mars en France sur prescription médicale. Il s'agit du tout premier d'une nouvelle classe médicamenteuse à être autorisé en Europe, notamment en France après un avis favorable de la Haute Autorité de santé *« pour le traitement de l'insomnie caractérisée par des symptômes présents depuis au moins trois mois et avec un impact significatif sur le fonctionnement pendant la journée »*. Contrairement à tous les hypnotiques actuels, le Quviviq *« ne vise pas à stimuler le sommeil pour endormir les gens,* explique Yves Dauvilliers, responsable de l'activité clinique et de recherche du laboratoire du sommeil au CHU de Montpellier. *Son mécanisme d'action consiste plutôt à diminuer l'état d'éveil, afin que le sommeil s'installe tout en réduisant les éveils nocturnes.* » Remboursé à 30 % par l'Assurance-maladie, il rejoint la longue liste de substances visant à soulager la détresse des insomniaques. Soit une vingtaine de médicaments dits hypnotiques délivrés uniquement sur ordonnance, tels Stilnox et Imovane, stars des somnifères vendues chaque année par dizaines de millions de boîtes. S'y ajoute un éventail de remèdes naturels, d'une efficacité souvent discutable, comme les oligo-éléments ou la phytothérapie *(lire l'encadré p. 58)*. Selon une étude publiée le 15 mars à l'initiative de la société d'équipements médicaux ResMed, trois Français sur dix consomment régulièrement l'un de ces produits pour les aider à dormir !

60 minutes
de sommeil supplémentaires environ sont obtenues après trois mois de traitement au Quviviq (*The Lancet,* 2022).

Les plus anciens médicaments prescrits à grande échelle pour induire le sommeil sont les barbituriques. Synthétisé en 1903 par l'Allemand et prix Nobel de chimie Emil Fischer, le premier spécimen a été le barbital (ou acide diéthylbarbiturique). Il sera suivi par d'autres molécules du même type comme le phénobarbital et le butobarbital, ou encore le thiopental, exploité pour sa part comme anesthésiant. Tous ces composés réduisent l'activité du système nerveux central. Ils miment et amplifient, en particulier, l'action du neurotransmetteur Gaba (acide gamma-aminobutyrique) qui se fixe sur certains neurones du cerveau pour les empêcher de transmettre des signaux électriques. *« Or, une partie de ces neurones sont impliqués dans les circuits cérébraux du sommeil »*, indique Marc Rey, neurologue et président de l'Institut national du sommeil et de la vigilance (INSV). En fonction du dosage et de leur durée d'action, les barbituriques vont donc réduire la transmission des informations sensorielles, diminuer la conscience et permettre finalement de nous endormir.

Des molécules qui finissent par perdre leur effet

Mais les barbituriques ont d'autres effets. Ils inhibent l'action du glutamate, neurotransmetteur associé à l'apprentissage, et se fixent sur des récepteurs Gaba qui n'interviennent pas dans les systèmes du sommeil. Agissant aussi sur le foie, ils rendent inefficaces des médicaments comme les contraceptifs oraux ou les anticoagulants. *« La dose dangereuse est par ailleurs très proche de la dose thérapeutique,* rappelle Sylvie Royant-Parola. *Une personne qui ingère trois comprimés au lieu d'un*

GODONG / BSIP

Les Z-médicaments — comme le zolpidem, avant-dernière classe d'hypnotiques mise sur le marché dans les années 1980 — sont davantage recommandés pour les insomnies d'endormissement que pour les réveils précoces. Car s'ils agissent très vite, leur efficacité maximale ne dure que quelques heures.

encourt une insuffisance respiratoire, un coma, et peut même en mourir. » Autant de raisons qui ont conduit à supprimer peu à peu les barbituriques, sauf pour contrôler les convulsions dans certains cas d'épilepsie.

Pour traiter l'insomnie, ils sont remplacés dès les années 1960 par une nouvelle famille de molécules : les benzodiazépines. Elles renforcent elles aussi le rôle du Gaba en réduisant l'activité cérébrale. Mais d'une façon beaucoup plus circonscrite, *« sans noyer de larges portions du cerveau »*, précise Marc Rey. Les benzodiazépines vont cibler spécifiquement les récepteurs Gaba du sommeil, au niveau du tronc cérébral en particulier, et ceux associés à la tension anxieuse. Et deviennent ainsi, très rapidement, le traitement de référence à la fois contre l'insomnie — au moyen du nitrazépam (Mogadon) ou du loprazolam (Havlane) par exemple — et pour calmer l'anxiété — avec le diazépam (Valium), le bromazépam (Lexomyl), l'alprazolam (Xanax), etc.

Dans les années 1980, des molécules possédant une structure chimique différente, mais un mode d'action très similaire aux benzodiazépines, arrivent à leur tour sur le marché. Il s'agit notamment du zolpidem (Stilnox) et de la zopiclone (Imovane), appelés aussi « Z-médicaments ». Ces composés possèdent plusieurs avantages. Encore plus sélectifs, ils se fixent sur certaines sous-unités des récepteurs Gaba, ce qui permet de discriminer plus finement les actions sédatives non anxiolytiques. Ils sont par ailleurs mieux tolérés et éliminés plus rapidement que les benzodiazépines, réduisant les effets résiduels le matin. Le zolpidem agissant très vite (la concentration maximale dans le sang peut être atteinte en trente minutes), mais surtout pendant quelques heures (sa « demi-vie » est d'environ deux heures et trente minutes), il est davantage recommandé pour les insomnies d'endormissement que pour les réveils précoces.

Dans de nombreux pays du monde, les prescriptions de benzodiazépines et Z-médicaments s'envolent. *« Les patients étaient satisfaits et les médecins convaincus qu'ils disposaient enfin de produits sûrs et efficaces pour les faire dormir à tous les coups »*, relève Sylvie Royant-Parola. Un changement d'at-

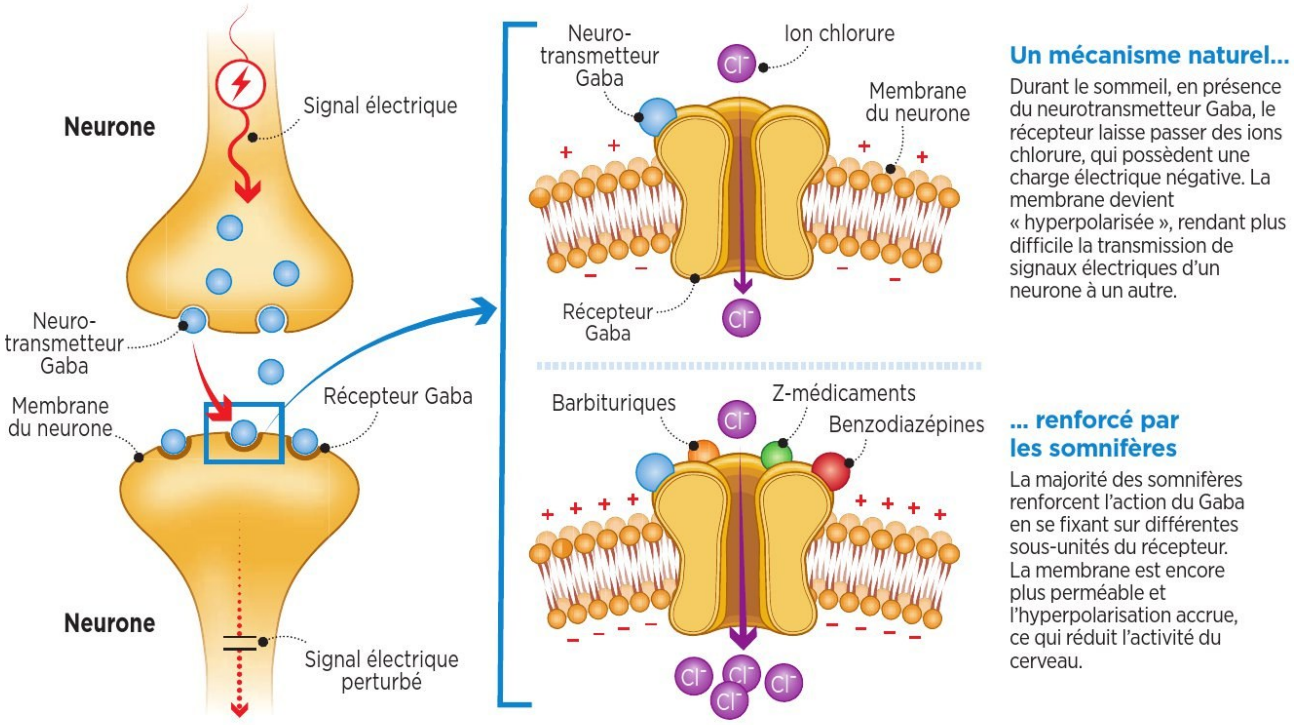
GABRIELLE VOINOT

« Le Quviviq ne vise pas à stimuler le sommeil pour endormir. Son mécanisme d'action consiste plutôt à diminuer l'état d'éveil »

Yves Dauvilliers, responsable de l'activité clinique et de recherche du laboratoire du sommeil au CHU de Montpellier

Comment les somnifères classiques agissent sur l'activité cérébrale

La plupart des somnifères actuels induisent l'endormissement en réduisant l'activité du cerveau. En se fixant à la surface de certains neurones, ils renforcent l'action du neurotransmetteur Gaba, qui empêche les neurones de communiquer entre eux.



Un mécanisme naturel...

Durant le sommeil, en présence du neurotransmetteur Gaba, le récepteur laisse passer des ions chlorure, qui possèdent une charge électrique négative. La membrane devient « hyperpolarisée », rendant plus difficile la transmission de signaux électriques d'un neurone à un autre.

... renforcé par les somnifères

La majorité des somnifères renforcent l'action du Gaba en se fixant sur différentes sous-unités du récepteur. La membrane est encore plus perméable et l'hyperpolarisation accrue, ce qui réduit l'activité du cerveau.

BRUNO BOURGEOIS

titude s'opère pourtant au début des années 2000. De plus en plus d'études pointent alors les répercussions d'une consommation trop large et excessive *(lire l'encadré p. 59)*, liées notamment à l'accoutumance. *« Si ces médicaments fonctionnent d'abord à merveille, ils perdent au bout de quelques semaines leur efficacité thérapeutique car l'organisme s'y habitue »*, signale la psychiatre. Des doses de plus en plus importantes deviennent alors nécessaires… jusqu'à ne plus fonctionner du tout ! Elles ne font, au contraire, qu'aggraver les effets secondaires et indésirables : fatigue diurne, état confusionnel, somnambulisme, difficultés d'attention et de mémorisation, troubles de l'équilibre pouvant entraîner des chutes ou accidents de la route, etc.

Or, il est souvent très difficile de s'en départir, surtout après des prises prolongées. Car le comprimé du soir est devenu un rituel : un « doudou » qui rassure, jugé même indispensable au moment d'affronter la nuit. La dépendance est également physiologique. *« Un arrêt brutal provoque des rebonds d'insomnie parfois pires que les symptômes d'origine,* rapporte Sylvie Royant-Parola. *Des plans de sevrage sur plusieurs semaines ou plusieurs mois seront ainsi nécessaires pour désaccoutumer les récepteurs neuronaux. »* Paradoxalement, ces puissants producteurs de sommeil peuvent donc entretenir et même aggraver l'insomnie ! D'où l'intérêt suscité par le Quviviq et cette nouvelle classe médicamenteuse. Les recherches ont débuté à la fin du siècle dernier, peu après la découverte d'un neurotransmetteur dénommé « orexine » (parfois aussi hypocrétine).

PHYTOTHÉRAPIE

Des remèdes naturels sans preuves scientifiques

Tilleul, camomille, valériane, aubépine, passiflore… Quantité de plantes sont réputées bénéfiques pour le sommeil. Seule la valériane a fait l'objet de plusieurs études et montré une légère efficacité *« sur la continuité du sommeil »*, rappelle toutefois le réseau de santé Morphée. Il s'agit par ailleurs uniquement d'essais cliniques : aucune substance active n'a été isolée parmi les milliers de molécules présentes dans la valériane. De manière plus générale, la phytothérapie bénéficie d'un effet placebo : la tisane du soir participe d'un rituel relaxant qui facilite l'endormissement. Les infusions ou huiles essentielles de plantes peuvent donc apporter certains bienfaits pour les troubles mineurs du sommeil.

Fabriqué par une population relativement restreinte de neurones de l'hypothalamus, il apparaît alors comme le principal stimulateur d'éveil dans le cerveau. Sa production est minimale au cours du sommeil, maximale pendant l'éveil. Et en administrant de l'orexine, on favorise la transition du sommeil vers l'éveil ou l'on prolonge celui-ci. « *Considérant que l'insomnie est une sorte d'hyper-éveil, on pourrait ainsi la combattre en bloquant temporairement ce neurotransmetteur* », énonce Marc Rey. Avec comme cible les récepteurs de l'orexine situés dans diverses régions du cerveau, comme le cortex ou le tronc cérébral. Pour inhiber ces récepteurs, la recherche pharmaceutique a synthétisé et expérimenté des dizaines de milliers de molécules. Jusqu'à aboutir, en 2014, au premier médicament du genre : le suvorexant, autorisé aux États-Unis, en Australie ainsi qu'au Japon. Les patients ne gagnent toutefois qu'une vingtaine de minutes de sommeil. « *La durée d'action est également un peu longue, engendrant des somnolences et maux de tête le matin* », note Yves Dauvilliers. Les prescriptions, de fait, sont restées assez marginales.

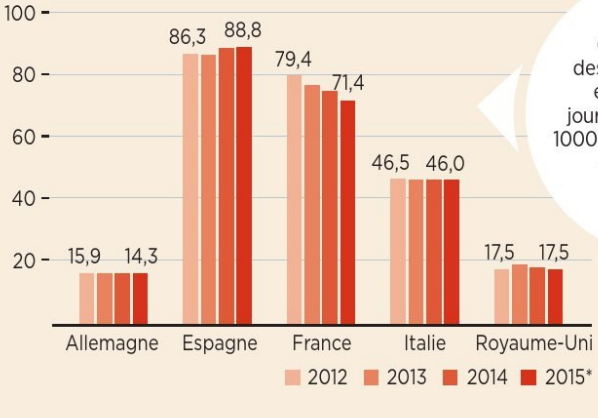
Une amélioration de la vigilance en journée

Développé par la biotech suisse Idorsia, le daridorexant (principe actif du Quviviq) présente un profil pharmacocinétique et des bénéfices bien plus prometteurs. En 2022, des études de phase 3 effectuées sur 1850 patients dans 17 pays prouvent qu'il réduit les temps d'endormissement et d'éveils nocturnes de 35 et 29 minutes respectivement (soit environ une heure de sommeil supplémentaire), après trois mois de traitement. Contrairement aux benzodiazépines et molécules apparentées, ce « coupeur d'éveil » conserve par ailleurs l'architecture globale du sommeil sans porter atteinte aux phases de sommeil profond, essentielles pour consolider la mémoire. « *Dès 2020, notre équipe a montré que le daridorexant n'engendrait en outre aucun effet secondaire diurne significatif,* fait valoir Yves Dauvilliers.

PRESCRIPTIONS

Les benzodiazépines toujours très consommées en France

Face à la surconsommation de benzodiazépines et molécules apparentées, les autorités sanitaires ont mis en œuvre une série de mesures. Elles ont consisté, depuis une vingtaine d'années, « *à sensibiliser davantage les médecins, limiter les traitements à 4 semaines pour l'insomnie et 12 semaines contre l'anxiété, établir des ordonnances sécurisées, ou encore réduire les taux de remboursement, ceux-ci passant de 65 % à 15 % en 2014* », liste François-Olivier Baudot, pharmacien et économiste de la santé à l'université Paris-Est Créteil. Ces recommandations ont entraîné une décrue depuis le début des années 2000. Mais les prescriptions sont restées très élevées. En 2017, un rapport de l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM) indiquait que la France se situait alors au 2e rang européen (parmi huit pays étudiés), 13,4 % de la population ayant consommé en 2015 ce type de substances, soit pour un usage anxiolytique (65 millions de boîtes), soit comme somnifères (46 millions). L'âge médian était de 49 ans pour les nouveaux utilisateurs, avec une majorité de femmes (65 %). Plus de 80 % des médicaments prescrits contre l'insomnie étaient alors des benzodiazépines et apparentés. « *C'est néanmoins en France que la consommation d'hypnotiques a le plus diminué depuis 2012 : de plus de 10 %, contre 5 % dans le reste de l'Europe* », précise François-Olivier Baudot. Mais la tendance s'est inversée depuis l'épidémie de Covid-19. En 2021, le groupement d'intérêt scientifique Epi-Phare constatait que les prescriptions avaient en effet augmenté de 1,4 million en un an.



Niveau de consommation des benzodiazépines en doses définies journalières (DDJ) pour 1000 habitants et par jour, de 2012 à 2015* pour cinq pays européens.

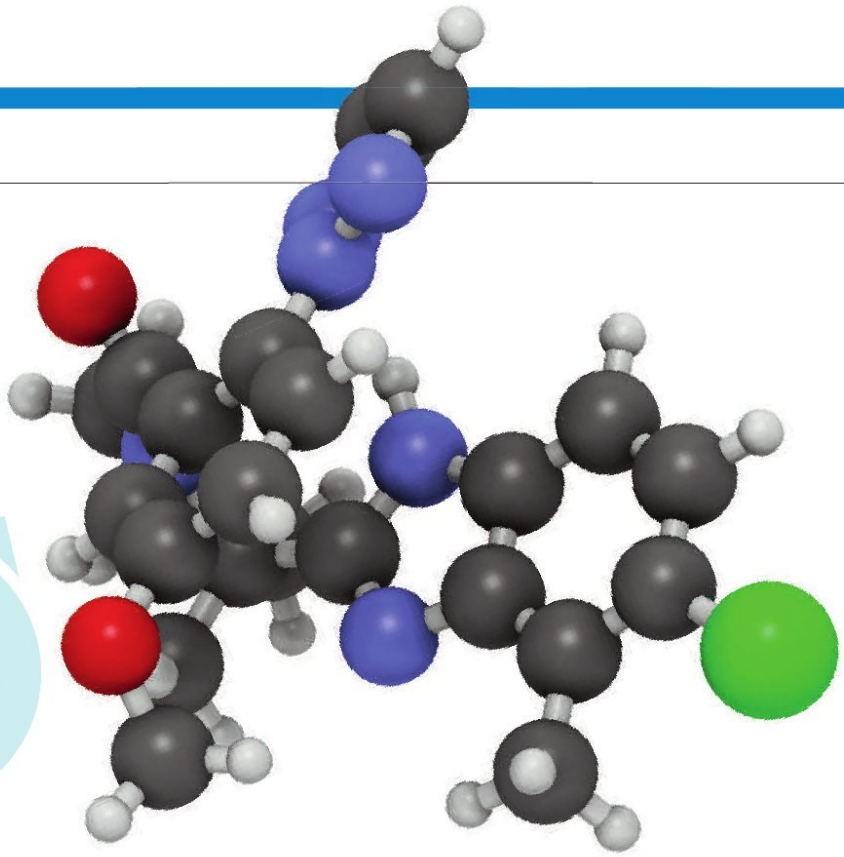
* DERNIÈRES DONNÉES DISPONIBLES

BRUNO BOURGEOIS - ANSM 2017

Et que les conséquences en journée, à la différence des hypnotiques actuels, vont plutôt dans le sens d'une amélioration de la vigilance, de la concentration et de la cognition. »

Le médicament reste efficace sans augmenter les doses

L'an dernier, le neurologue montpelliérain a participé à deux autres études très encourageantes. La première indique que les effets positifs du daridorexant persistent pendant au moins douze mois sans avoir besoin d'augmenter les doses. L'autre, qu'il réduit le nombre et la durée des éveils en milieu et fin de nuit, tout en conservant ceux de courtes périodes (inférieures à six minutes). « *C'est une propriété très intéressante,* insiste le chercheur. *Car si les éveils nocturnes de plus de trente minutes sont très handicapants pour les patients, ceux qui ne durent que quelques minutes ou dizaines de secondes procèdent d'un système naturel d'alerte, pour entendre les pleurs d'un enfant ou réagir en cas d'incendie, par exemple. Or, les somnifères classiques tendent à supprimer, là encore, ces microréveils.* »



La nouvelle molécule, le daridorexant (principe actif du Quviviq), empêche la liaison des molécules d'orexine, qui induisent l'éveil.

MOLEKUUL.BE/ALAMY/PHOTO12.COM

Déjà disponible aux États-Unis, en Italie, en Allemagne, en Suisse, en Espagne et en Grande-Bretagne, le Quviviq arrive donc à présent en France où « *il pourrait être largement prescrit en raison de ses avantages et de son nouveau mode d'action* », estime Yves Dauvilliers. Sa place reste néanmoins à établir parmi les autres somnifères et dans la pratique clinique, en fonction des interactions médicamenteuses, d'éventuelles comorbidités, et bien sûr du type d'insomnie. « *Nous manquons certes encore de recul et verrons à l'usage comment l'exploiter au mieux,* souligne Sylvie Royant-Parola. *Les effets du Quviviq apparaissent surtout au bout de deux semaines. N'étant pas un inducteur de sommeil phénoménal comme le zolpidem, il agira donc plutôt sur la continuité du sommeil et les éveils nocturnes.* » Marc Rey le considère aussi comme un outil supplémentaire, et non comme la pilule définitive prescrite au tout-venant. « *Nous ne devons pas reproduire les mêmes erreurs qu'avec les benzodiazépines et Z-médicaments,* avertit l'expert. *Et savons pertinemment, aujourd'hui, que l'insomnie chronique ne se résout pas uniquement avec des médicaments.* » Car le sommeil, insiste-t-il, ne se résume pas à une simple bascule physiologique, mais procède avant toute chose d'une somme de comportements. ■ **F. D.**

HORMONE

La mélatonine recale l'horloge interne

Les compléments alimentaires à base de mélatonine ont envahi les rayons des pharmacies et supermarchés. Avec la promesse — entre autres choses — de retrouver un sommeil réparateur et dormir plus rapidement. La mélatonine n'est pourtant pas un somnifère. Sécrétée par la glande pinéale du cerveau, cette hormone indique à notre organisme qu'il est temps de fermer l'œil. Sa production augmente en fin de journée lorsque la lumière diminue. Jusqu'à atteindre un pic vers 3 heures du matin, puis une valeur minimale aux premières lueurs du jour. La mélatonine de synthèse est donc « *spécifiquement indiquée pour les personnes souffrant d'un trouble du rythme veille-sommeil,* précise le neurologue Marc Rey. *À la suite d'un* jet lag *ou d'horaires de travail décalés, par exemple, ou pour les patients de plus de 55 ans qui ne sécrètent plus assez ce donneur de temps* ». Prescrits sur ordonnance, des comprimés de Circadin contenant 2 mg de mélatonine permettent ainsi de recaler notre horloge biologique après deux à trois semaines de traitement.

Les bienfaits des thérapies cognitives

Les thérapies comportementales et cognitives sont très efficaces contre l'insomnie chronique. Avec des bénéfices qui se maintiennent sur le long terme, à la différence des somnifères. Notre journaliste, insomniaque depuis des années, a tenté l'expérience.

En séances collectives ou individuelles, la thérapie encadrée par un psychologue permet de recouvrer le sommeil sur le long terme.

GETTYIMAGES

Trois ans que je me débattais avec mes problèmes de sommeil, accablé par un état de fatigue et de stress récurrent, m'assoupissant même à certaines occasions dans les bureaux de *Sciences et Avenir*. J'avais testé, bien sûr, tout un tas de remèdes : sédatifs légers proposés en pharmacie, rejoindre mon lit deux heures plus tôt que le moment habituel, siestes le week-end, méditation, etc. Les séances d'hypnose avaient produit certains bénéfices… disparus hélas ! au bout de quelques semaines. Je retombais toujours dans les affres de l'insomnie. Forcé, lors des crises les plus sévères, de supplier une suite de médecins généralistes et psychiatres de me prescrire les plus puissants somnifères. Seules ces béquilles chimiques m'apportaient du répit, avant que le cercle vicieux de l'insomnie ne reprenne.

C'est au hasard d'une réunion de famille, à l'automne dernier, qu'un des convives m'a recommandé un « *véritable* » spécialiste du sommeil. Ce qui tombait dans tous les cas plutôt bien, ma énième ordonnance d'hypnotique allant bientôt expirer. Je prends alors rendez-vous. Après un examen clinique, le médecin m'invite à remplir plusieurs questionnaires et, face à mon insistance, me

prescrit les indispensables pilules. Son verdict est néanmoins simple et sans appel : *« Contre l'insomnie chronique, les thérapies comportementales et cognitives (TTC) sont les méthodes les plus efficaces, surtout sur le long terme. »* Force est de reconnaître que je n'avais encore jamais entendu parler des « TCC de l'insomnie ». Outre l'ordonnance, je repars donc avec l'adresse d'un praticien résidant rue du Laos à Paris, à quelques centaines de mètres du journal.

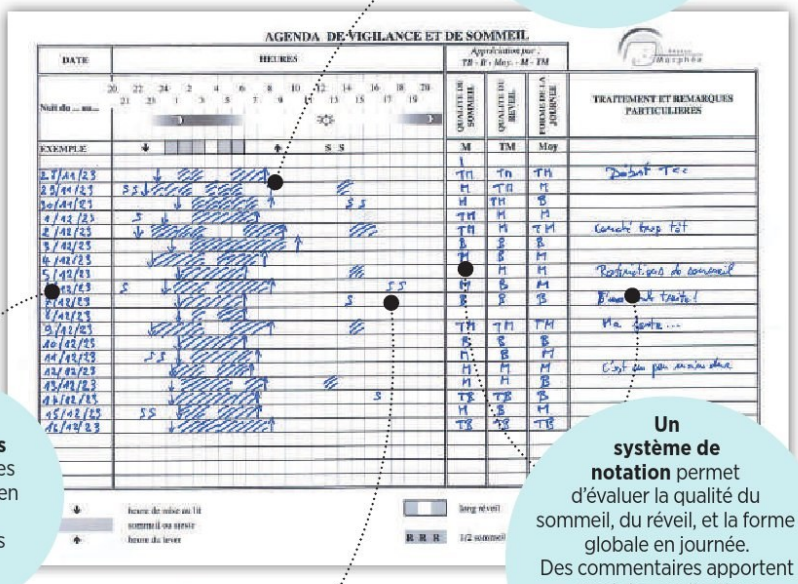
Un mois et demi, à raison d'une séance par semaine

Celui-ci, le psychologue Livio de Sanctis, m'explique au téléphone que la thérapie est relativement brève : un mois et demi environ, à raison d'une séance par semaine. Celle-ci est soit individuelle, en visioconférence, soit collective et en présentiel à Paris, *« la deuxième option ayant l'avantage de créer une synergie et d'alléger les sentiments de solitude et d'incompréhension pesant sur une majorité d'insomniaques »*, me convainc-t-il. Je choisis donc le groupe du lundi à 19 h 30, tout comme six autres patients. En les rencontrant, je constate qu'une variété d'âges et de catégories socioprofessionnelles est représentée. Tous ont la mine triste — moi y compris —, le visage fermé. *« Si vous êtes ici, c'est parce que vos insomnies durent depuis plusieurs mois ou années et que tout ce que vous avez entrepris n'a pas fonctionné,* résume Livio de Sanctis lors de la réunion inaugurale. *Mais rassurez-vous : les TCC apportent d'excellents résultats. »* Cette séance est consacrée aussi à nos parcours d'insomniaques. En racontant que mes nuits ont commencé à être déstructurées au début de l'épidémie de Covid et que je suis devenu « accro » aux somnifères, je constate que je suis loin d'être le seul.

D'autres causes originelles sont évoquées : décision professionnelle difficile, perte d'un être cher, etc. Le thérapeute nous interroge ensuite sur nos profils de dormeurs : *« Êtes-vous plutôt du soir ou du matin ? De combien d'heures de sommeil pensez-vous avoir besoin ? »* Puis, sur nos types d'insomnie : *« Avez-vous des difficultés à vous endormir, à rester endormi, des réveils précoces ? Combien de fois cela vous arrive-t-il par semaine ? »* Ces questions allaient devenir routinières. Car nous devrons remplir, chaque jour, un « agenda du sommeil », précisant nos heures de coucher et de réveil, éveils nocturnes, somnolences en journée, repas et horaires de travail *(voir ci-dessus)*. Certes un peu contraignant, l'outil est fondamental. C'est grâce à lui, en effet, que le praticien identifiera nos mauvaises habitudes et problèmes spécifiques, ajustant la TCC à la situation de chacun. Il per-

L'indispensable agenda du sommeil

Chaque participant à la thérapie doit remplir cette grille. Un outil qui permet au praticien d'identifier les mauvaises habitudes et les problèmes spécifiques.



Les flèches pointées vers le bas et le haut indiquent les moments où l'on éteint la lumière et se lève du lit. Les cases hachurées, le temps effectif de sommeil, sans avoir besoin d'être trop précis.

Les informations sont consignées chaque matin en fonction des souvenirs de la nuit.

L'état du patient pendant la journée est renseigné le soir : siestes éventuelles mais aussi somnolences représentées par un « S ».

Un système de notation permet d'évaluer la qualité du sommeil, du réveil, et la forme globale en journée. Des commentaires apportent aussi des explications contextuelles : prise de médicaments, fièvre, sport le soir, etc.

LIVIO DE SANCTIS

« Il faut en finir avec l'anxiété de performance, tout comme les attentes irréalistes concernant une nuit parfaite »

Livio de Sanctis, psychologue, spécialiste du sommeil à Paris

mettra d'estimer aussi l'« efficacité du sommeil » : le pourcentage du temps passé au lit la nuit et qui est réellement attribué à dormir. Trop faible chez un insomniaque, l'indice est censé grimper jusqu'au chiffre (normal pour les bons dormeurs mais pour nous indécent) de 85 % et plus.

Renforcer le lien entre le sommeil et le lit

Comme son nom l'indique, une TCC possède une composante comportementale et une autre cognitive. *« La première agit sur la physiologie du sommeil et ses processus de régulation »*, énonce doctement Livio de Sanctis. Car nous avons eu droit — et c'est essentiel pour la thérapie — à des explications très instructives sur les mécanismes clés. Notamment la « pression de sommeil », qui nous pousse à dormir. Elle augmente proportionnellement tel un sablier avec la durée de l'éveil, se renforce avec la fatigue. D'où ces recommandations : pratiquer des exercices physiques (en journée, pas le soir) et réduire significativement le temps passé dans son lit. Celui-ci est *« toujours trop important chez les insomniaques, ce qui entretient la frustration, le stress et finalement l'insomnie »*, assure Livio de Sanctis. Notre « coach » a donc concocté des programmes de restrictions personnalisées de la fenêtre de sommeil. Pour moi : coucher à une heure et lever à six heures. Tous les jours, même le week-end ! Dans un premier temps, heureusement, ces restrictions étant peu à peu relâchées.

Appelée « contrôle du stimulus », une autre technique a permis de renforcer le lien entre le sommeil et le lit. Elle implique d'utiliser celui-ci uniquement pour dormir (et les rapports intimes). Et de le quitter au bout d'une vingtaine de minutes si l'on ne trouve pas (ou plus) le sommeil. Consignes qui n'ont pas toujours été faciles à appliquer, dois-je bien reconnaître… Mais ça marche : quel bonheur, même si les nuits sont courtes au début de la thérapie, de dormir enfin d'une seule traite. Et sans somnifère !

La partie cognitive a été aussi très enrichissante. Objectif : enterrer la hache de guerre avec les pensées et émotions négatives qui nous assaillent et tournent en boucle lors des éveils nocturnes. Cas d'espèce (personnel) : *« Il faut absolument que je dorme sinon ma journée de demain sera bousillée, je serai nul en conférence de rédaction, etc. »* Un insomniaque ne le sait pourtant que trop bien : plus on cherche le sommeil, plus il nous échappe. L'idée est donc plutôt de le laisser venir, de se laisser surprendre. *« Et d'en finir avec l'anxiété de performance, cette peur des conséquences qu'engendrerait nécessairement une mauvaise nuit, tout comme les attentes irréalistes concernant une nuit parfaite »*, insiste Livio de Sanctis. Pour modifier notre dialogue interne, il nous enseigne des techniques de « restructuration cognitive ». Le principe : identifier et remplacer les pensées obsédantes, souvent fausses et négatives, par des alternatives plus réalistes, utiles, positives. Exemples : *« Tout compte fait, je m'en suis toujours plus ou moins bien sorti au boulot ; personne n'est toujours au top de ses performances, etc. »* Autant de compétences — et bien d'autres encore — que je ne peux détailler ici mais ô combien précieuses ! *« À l'avenir, vous pourrez connaître comme tout le monde des nuits difficiles,* prévient devant nos visages apaisés Livio de Sanctis, lors de l'ultime séance. *Mais en les abordant de façon moins stressante, dramatique, et en sachant désormais comment réagir. »* ■ **F. D.**

TRAITEMENT

Une méthode encore trop peu utilisée

Pour plus de 80 % des patients, les thérapies comportementales et cognitives (TCC) améliorent significativement la plainte d'insomnie, la latence d'endormissement, la veille intra-sommeil et l'efficacité du sommeil. Cela est attesté depuis une trentaine d'années par quantité d'études. Avec des bénéfices qui se maintiennent généralement sur le long terme, bien plus qu'avec les traitements médicamenteux et sans leurs effets secondaires. Les TCC de l'insomnie sont pourtant largement sous-utilisées. Comment l'expliquer ? Elles requièrent certes une bonne dose de motivation et d'efforts, au regard d'une prise de somnifères notamment. Coûtant environ 70 euros par séance, les TCC sont par ailleurs *« très mal remboursées par l'Assurance-maladie, même si des progrès ont été réalisés ces dernières années »*, reconnaît la psychiatre Sylvie Royant-Parola. Le problème majeur est néanmoins la disponibilité. *« Le nombre de praticiens est très en deçà de ce qu'il faudrait pour répondre à une pathologie touchant des millions de personnes »*, indique l'experte. Pour y remédier, le développement de plateformes numériques constitue probablement la meilleure solution, à l'instar de ThéraSomnia, premier programme français de TCC de l'insomnie en ligne. Créé en 2016 par le neurologue montpelliérain Michel Billiard, il propose des recommandations, parcours personnalisés et agendas de sommeil, sous le suivi de coachs-psychologues qui demeure indispensable.

Idées reçues : nos conseils pour retrouver le sommeil

Les insomniaques tenteraient tout pour une bonne nuit de sommeil. Mais attention aux mauvais réflexes qui ne font qu'aggraver la situation.

L'horloge affiche 3 h 47 du matin. Après une énième nuit sans sommeil, tous vos espoirs reposent sur Google. Au milieu de la nuit, le nez sur l'écran bleu, vous tapez « insomnie que faire ? » dans un moment de détresse. Les conseils en tout genre se bousculent. Ici une application contre le stress, là une publicité pour un nouveau matelas. *« Peut-être que c'est juste parce que tu cogites trop ? Tu as essayé de te faire une infusion avant de dormir ? »* demandent vos amis. Si ces suggestions semblent bien intentionnées, elles ne font partie ni des recommandations de l'Institut national du sommeil et de la vigilance (INSV) ni des méthodes évaluées dans des travaux scientifiques solides.

BRUNO BOURGEOIS

Pour savoir ce qui fonctionne vraiment ou pas, une équipe de l'université de Tokyo (Japon) a passé en revue 241 études sur l'insomnie, englobant plus de 30 000 adultes. Les résultats ont été publiés en janvier : *Sciences et Avenir* fait le point sur ce qui est efficace et ce qui ne l'est pas pour retrouver des cycles de sommeil réguliers.

Il faut dormir huit heures pour être en forme

FAUX La science s'accorde à dire qu'un adulte a, en moyenne, besoin de sept à neuf heures de sommeil par nuit. D'où ce chiffre de huit heures que nombre d'entre nous avons en tête. En réalité, tout le monde n'a pas les mêmes besoins selon son âge, son activité ou même son patrimoine génétique. *« De nombreux patients ont cette pensée automatique mais elle est fausse. En particulier pour les personnes âgées qui ne sont plus capables de dormir autant »*, explique Yuki Furukawa, auteur de la méta-analyse parue dans *Jama Psychiatry* et spécialisé en neuropsychiatrie à l'hôpital universitaire de Tokyo. La faute à une baisse de la réponse à la mélatonine, une hormone liée à l'endormissement. *« Les seniors éprouvent une diminution de la quantité et de la qualité du sommeil. Certains se sentent en pleine forme au milieu de la nuit. D'autres ont des phases décalées et s'endorment vers 20 h pour se réveiller à 4 h du matin »*,

10 recommandations de l'Institut national du sommeil et de la vigilance

Pas de café ni de coca
Modérez votre consommation de café, thé, coca, boissons énergisantes et évitez d'en boire après 14 h.

Un coucher à heure fixe
Semaine ou week-end, peu importe, les horaires de lever et de coucher doivent être les mêmes chaque jour.

Respectez votre rythme
Chacun a des besoins différents. Aux premiers signes de fatigue, écoutez-vous et allez-vous coucher.

La lumière du jour
Exposez-vous au soleil, en particulier le matin, afin d'aider votre organisme à réguler l'horloge biologique.

Du sport, mais pas le soir
Pratiquez une activité physique de façon régulière. Attention à bien s'arrêter trois à quatre heures avant le coucher.

complète le Dr Pierre Arquillière, somnologue et psychiatre au centre du sommeil d'Aubagne (Bouches-du-Rhône). Certains gènes portent également des mutations entraînant des besoins en sommeil très réduits, de quatre à six heures par nuit.

Cela ne sert à rien de vouloir « rattraper » le sommeil

VRAI Après une mauvaise nuit, inutile de vouloir compenser par des siestes dans la journée ou le week-end qui suit. *« Il faut relativiser cette dette de sommeil. On continue de se lever à l'heure normale pour ne pas accumuler de décalage le matin. Et le soir, on évite les activités qui maintiennent éveillé »*, conseille Pierre Arquillière.
Plusieurs pratiques ont fait leurs preuves pour retrouver son rythme de sommeil, comme limiter le temps passé au lit. L'idéal est d'y rester le temps d'une « bonne nuit » plus trente minutes. Pour une personne qui a besoin de sept heures de sommeil, cela correspond donc à sept heures et trente minutes dans le lit, peu importe le temps d'éveil et de sommeil. Les heures de coucher et de lever doivent être fixes. Enfin, le lit et *a fortiori* la chambre doivent être dédiés exclusivement au sommeil (et aux relations intimes). Ces mesures permettent de « recalibrer » la survenue du sommeil pour arriver progressivement aux sept heures désirées *(lire aussi p. 61)*.

Y. FURUKAWA

« La détente muscle après muscle a une influence contre-productive. La relaxation entraîne un temps d'éveil plus long »
Yuki Furukawa, clinicien spécialisé en neuropsychiatrie à l'hôpital universitaire de Tokyo (Japon)

Se relaxer permet de s'endormir plus vite

FAUX Écouter des sons de vent dans les arbres, pratiquer un exercice de respiration en contrôlant son souffle, suivre un exercice guidé sur une application… Les outils de relaxation pullulent sur Internet. Nombre d' insomniaques y ont recours pour tenter de faire retomber la tension et favoriser un état compatible avec l'endormissement. Or, aussi surprenant que cela puisse paraître, ce réflexe est contre-productif. Les travaux de l'université de Tokyo montrent qu'au contraire, les séances de relaxation tendent à retarder l'endormissement. *« La respiration abdominale ou la détente muscle après muscle ont une influence contre-productive. La relaxation entraîne un temps d'éveil plus long »*, précise Yuki Furukawa. Réussir à se relaxer devient finalement un objectif à atteindre. Au lieu d'avoir un moment de bien-être, les patients se mettent trop de pression : *« Pourquoi je ne dors pas ? Je devrais dormir puisque j'ai fait ma séance de relaxation. Peut-être que j'ai mal fait l'exercice. Bon, il arrive, ce sommeil ? Etc. »* De quoi se faire des nœuds au cerveau quand il faudrait tomber dans les bras de Morphée.

On peut s'en sortir seul avec Google

Plutôt **FAUX** Se coucher et se lever à heures fixes, préférer une activité calme et sans écrans avant d'aller au lit… Les insomniaques ont beau savoir ce qu'il faut faire pour avoir une bonne hygiène de sommeil, cela n'améliore pas leurs nuits. *« On suppose que les patients ont testé les recommandations officielles pour avoir une bonne nuit de sommeil mais n'y sont pas parvenus. L'éducation au sommeil seule ne suffit vraisemblablement pas. Il faut qu'elle soit associée à d'autres méthodes qui fonctionnent, comme les thérapies comportementales et cognitives* [lire p. 61] », commente Yuki Furukawa. Surtout, les interactions avec un thérapeute se sont montrées bien plus bénéfiques que les méthodes visant à se soigner tout seul, sans l'aide d'un professionnel. Dans tous les cas, les encouragements de la part des proches semblent ▸

Manger ni trop ni trop peu
Ne sautez pas de repas pour éviter les fringales nocturnes. À l'inverse, les repas trop lourds sont aussi à proscrire.

Une soirée détente
Musique douce, lecture, activité manuelle... Le soir, mieux vaut se concentrer sur une activité calme et sans écrans.

Une chambre adaptée
Aménagez-vous une chambre propice au sommeil : silence, obscurité et température entre 18 et 20 °C.

Pas d'écrans
Environ une heure avant le coucher, laissez les écrans de côté. Téléphone, tablette et ordinateur restent éteints jusqu'au lendemain.

Au lit, on dort
Restez un temps limité au lit pour maintenir une association entre le lit et le sommeil. Si vous ne dormez pas, levez-vous.

avoir un effet vertueux. Raison de plus pour ne pas rester dans son coin à ruminer son problème.

Les insomniaques dormiront mal toute leur vie

FAUX Et heureusement. Après plusieurs mois, voire années de mauvais sommeil, on serait tenté de se dire *« je suis comme ça, je dors mal »* ou *« c'est trop tard pour s'en sortir »*. Pour éviter de s'enfermer dans ces pensées négatives, les thérapies dites de la troisième vague ont fait leurs preuves. Ces méthodes consistent à accepter les pensées qui nous traversent sans y accorder trop d'importance. La méditation de pleine conscience a pour but d'observer ses pensées et ses émotions sans jugement (par exemple, être excédé par une énième nuit sans réussir à bien dormir). La thérapie d'acceptation et d'engagement, elle, a pour but d'accepter ses pensées tout en changeant son regard sur soi. Et décoller cette étiquette d'« irrémédiable insomniaque » qui vous colle à la peau.

Les écrans sont à bannir en soirée

VRAI Difficile de lâcher les écrans. Et pourtant, la partie de Scrabble en ligne, la rédaction d'un mail ou les vidéos regardées en soirée peuvent être délétères pour le sommeil. *« Limiter l'exposition à la lumière des écrans le soir ne suffit pas ! Il faut aussi minimiser l'hyper-éveil ou le stress induit par la cyberconnexion avant de s'endormir. En bref, on instaure un "couvre-feu digital" au profit d'activités relaxantes comme la lecture ou la musique… Et on met son téléphone en mode avion pour éviter tout réveil intempestif »*, préconise l'INSV. Les réseaux sociaux, jeux vidéo et mails renforcent l'éveil cérébral et retardent l'endormissement, selon une récente étude de l'université d'État de Pennsylvanie (États-Unis). *« Le stress du travail, l'effet galvanisant des réseaux sociaux ou du jeu vidéo ont un effet sur l'éveil. En soirée, mieux vaut se détendre avec des activités douces au moins trente minutes à deux heures avant le coucher »*, conseille le Pr Russell Foster, neuroscientifique spécialisé dans le rythme circadien à l'université d'Oxford (Royaume-Uni). Et, si possible, dans une ambiance tamisée, afin de respecter le rythme circadien et favoriser l'arrivée de la somnolence lorsque la lumière du jour décline.

Le café réveille et l'alcool aide à dormir

VRAI et **FAUX** Quand le manque de sommeil se fait criant, la tentation de s'accrocher à son café comme à une bouée de sauvetage est forte. Mais cette habitude finit par avoir des effets contre-productifs, la caféine empêchant de s'endormir le soir venu. *« Les effets de la caféine peuvent durer jusqu'à huit heures dans l'organisme. Une tasse de café en fin d'après-midi peut empêcher de s'endormir la nuit »*, préviennent les National Institutes of Health américains. Mieux vaut s'arrêter autour de 14 h pour un coucher vers 22 h. Quant au verre d'alcool censé aider à l'endormissement, il est préférable de ne pas déboucher la bouteille. Deux verres d'alcool pour un homme et un chez une femme font baisser la qualité du sommeil de 24 %, selon une étude finlandaise de 2018. Dès le premier verre, une réduction de 9,3 % est constatée chez l'homme et la femme. Les insomniaques ont donc tout intérêt à surveiller ce qu'ils mettent dans leur verre. Même la cigarette en soirée serait à proscrire, selon de récents travaux. La nicotine, un stimulant, aggrave l'insomnie et réduit le temps de sommeil. ■ **C. L.**

INSTITUT MÉDICAL DU SOMMEIL

VERBATIM

JONATHAN TAÏEB MÉDECIN DU SOMMEIL, FONDATEUR DE L'INSTITUT MÉDICAL DU SOMMEIL À PARIS.

Objets connectés : gare à l'orthosomnie

" Plus d'un quart de mes patients évoquent, en consultation, les objets connectés qu'ils utilisent pour améliorer leur sommeil, signe d'un marché florissant. Une première catégorie d'objets concerne l'environnement de sommeil : boucles sonores relaxantes à l'heure du coucher, contrôle de la température, lumières douces et progressives pour simuler l'aube, etc. Sous forme de montres, bagues, bandeaux ou capteurs placés sous le matelas, un second type d'objets effectuent des suivis ; ils enregistrent les mouvements du corps, la respiration, la fréquence cardiaque ou la saturation d'oxygène dans le sang. Ces outils peuvent aider leurs utilisateurs à adopter de meilleurs comportements. Mais certains véhiculent aussi un tas de fausses promesses tels l'enregistrement du sommeil profond ou la détection de l'apnée du sommeil, qui nécessite, elle, un polygraphe respiratoire. Le risque majeur réside toutefois dans la focalisation excessive sur les données du sommeil. Car à force de vouloir le contrôler et le monitorer, les utilisateurs pourront développer des attentes irréalistes et de l'anxiété qui dégraderont la qualité de leurs nuits… Et feront d'eux, ironiquement, des insomniaques ! Dans notre jargon, nous appelons cela l'orthosomnie. "

Propos recueillis par F. D.

25 SCIENTIFIQUES
PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Objectif : vivre 120 ans en bonne santé

Cassures d'ADN, altérations épigénétiques, raccourcissement des télomères… Les chercheurs ont déjà identifié une douzaine d'événements qui contribuent au vieillissement cellulaire. Interférer sur ce processus biologique permettrait de mieux combattre les pathologies liées à l'âge.

Par Nicolas Gutierrez C.

Cancers, maladies cardio-vasculaires ou neurodégénératives… Les pathologies les plus meurtrières aujourd'hui sont toutes liées à l'âge. À tel point que le vieillissement n'est plus simplement considéré comme un facteur de risque, mais comme la cause même de ces maladies. *« Les recherches sur la biologie du vieillissement convergent vers ce nouveau concept: la vieillesse serait la mère des maladies et les pathologies liées à l'âge ne seraient que les conséquences de ce processus biologique »*, lance Jean-Marc Lemaitre, directeur de recherche Inserm à l'Institut de médecine régénératrice et de biothérapie de Montpellier (IRMB). Une nouvelle approche dont découle cet objectif: bloquer le vieillissement pour éviter ces maladies causées par l'âge.

Mais pour stopper ce processus, il faut d'abord le comprendre. Les experts du domaine ont déjà identifié une douzaine d'événements qui contribuent au vieillissement cellulaire, détaillés dans un article publié dans le journal *Cell*. *« Il s'agit d'un processus biologique qui nous atteint tous, caractérisé par des mécanismes moléculaires et cellulaires qui, ensemble, déterminent le phénotype du vieillissement »*, résume Carlos López-Otín, auteur de l'article et professeur de biochimie et biologie moléculaire à l'université d'Oviedo, en Espagne. Certains de ces mécanismes déclenchent directement le processus du vieillissement en causant des dommages qui s'accumulent avec l'âge, tels que les cassures d'ADN, les altérations épigénétiques — marques régulant l'expression des gènes — et le raccourcissement des télomères, des morceaux d'ADN qui protègent l'extrémité des chromosomes. Autant de mécanismes qui, *in fine*, conduisent à une inflammation chronique des tissus et à l'épuisement des cellules souches *(voir l'infographie p. 70)*.

De nombreuses recherches ont montré que ces événements, loin d'être indépendants, sont liés. Ainsi, des interventions ciblant l'un de ces mécanismes pourraient avoir une conséquence sur les autres, et donc sur tout le processus du

J.-M. LEMAITRE

« Les recherches convergent vers ce nouveau concept : la vieillesse serait la mère des maladies »

Jean-Marc Lemaitre, directeur de recherche Inserm à l'Institut de médecine régénératrice et de biothérapie de Montpellier

NADIA RABHI POUR SCIENCES ET AVENIR- LA RECHERCHE

vieillissement cellulaire. Encore faut-il identifier la cible la plus pertinente pour l'enrayer dans sa globalité. De ce point de vue, ce sont les altérations épigénétiques qui ont une longueur d'avance. *« De nombreux mécanismes interviennent dans le vieillissement de la cellule, mais ils sont très variables d'un individu à l'autre,* relève Steve Horvath, chercheur à l'Institut de science Altos Labs à Cambridge (Royaume-Uni). *Tous sauf un : la méthylation de l'ADN.* » C'est-à-dire les modifications chimiques qui opèrent pour réguler l'expression des gènes. *« Ces méthylations sont très étonnantes, car on dirait qu'une partie de ces modifications suit un programme très précis : elles sont très similaires d'un individu à l'autre, à travers toutes les espèces de mammifères ! »*

Cette « programmation » très précise que l'âge semble imposer à ces méthylations concerne principalement les cytosines (le « C » des quatre acides nucléiques, ou lettres, qui composent notre ADN : ATCG). L'équipe de Steve Horvath à l'université de Californie à Los Angeles (États-Unis) — où il était professeur avant de rejoindre Altos Labs — a mis en évidence un groupe de près de 12 000 cytosines très bien conservées chez les mammifères et dont la méthylation permet d'estimer l'âge de chaque espèce. Une véritable horloge biologique présentée en août 2023 dans le journal *Nature Aging*, dix ans après avoir montré sa grande précision chez les humains. *« Je pense que l'existence de cette horloge épigénétique est due au fait que ces méthylations jouent aussi un rôle dans le développement de l'organisme. Lequel consiste en une*

programmation des cellules dont ferait partie le vieillissement, juge Steve Horvath. *Ainsi, la dégradation liée à l'âge n'est pas seulement causée par l'entropie, comme une voiture qui rouille avec le temps. Une partie de ce processus est programmée. Ce qui veut dire qu'on peut la reprogrammer.* »

Reprogrammer les cellules pour les rajeunir

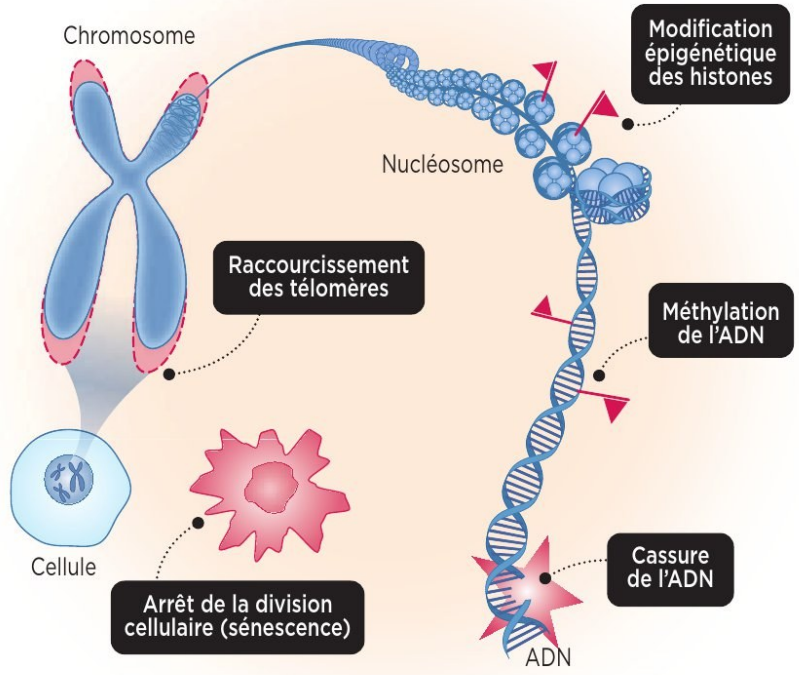
C'est précisément à cela que s'attachent nombre d'équipes : remettre à zéro le programme épigénétique de la cellule. Notamment en adaptant un procédé qui permet de transformer les cellules adultes en cellules souches pluripotentes pouvant se différencier en n'importe quel type cellulaire. Une technique extraordinaire qui avait valu le prix Nobel de médecine 2012 à ses concepteurs : le Japonais Shinya Yamanaka et le Britannique John Gurdon. C'est ce que tente de faire Vittorio Sebastiano à l'université Stanford (États-Unis) : « *Nous donnons aux cellules un cocktail d'ARN messagers codant des protéines qui reprogramment la cellule, mais on ne les traite que sur un laps de temps très court, pour que la cellule rajeunisse mais ne perde pas son identité.* » Avec cette technique, son équipe a rajeuni le muscle de souris de 24 mois (équivalent à un âge de 90 ans pour un humain), pour le rendre semblable à celui de souris de 6 mois (équivalent à 30 ans). L'objectif de son équipe est désormais d'utiliser ce cocktail pour rajeunir des tissus spécifiques du corps humain, en donnant un coup de jeune aux cellules souches fatiguées afin qu'elles régénèrent le tissu dégradé par l'âge ou la maladie. Avec sa start-up Turn Bio, il espère lancer son premier produit rajeunissant pour la peau en 2025.

Outre l'épigénétique, un autre aspect du vieillissement cellulaire semble étroitement lié à l'âge biologique : la longueur des télomères. Ces structures sont faites d'ADN non codant sur lequel se fixent des protéines qui, ensemble, forment comme un capuchon protégeant les extrémités des chromosomes. « *Nos chromosomes sont linéaires, cela veut dire que leurs extrémités ressemblent beaucoup à une cassure de l'ADN, comme il en arrive tout le temps. Sans les télomères, celles-ci seraient reconnues comme des cassures accidentelles par les systèmes de réparation, qui essaieraient de les recoller. Cela entraînerait des instabilités chromosomiques, les cellules arrêteraient de se diviser et la vie serait impossible* », détaille le Pr Éric Gilson, de l'Institut de recherche sur le cancer et le vieillissement (Ircan) à Nice. Reste qu'à chaque division cellulaire, ces télomères raccourcissent. Jusqu'à devenir trop courts pour assurer leur fonction protectrice. C'est alors que la cellule arrête de se diviser et entre en sénescence.

Cibler les cellules sénescentes

Certaines équipes travaillent donc à rallonger ces télomères pour retarder l'arrivée de la sénescence cellulaire, étape clé du vieillissement. Par exemple, Maria Blasco, directrice du groupe Télomères et télomérase au Centre national de recherche sur le cancer en Espagne (CNIO), cherche à traiter les cellules avec de la télomérase, une enzyme naturellement produite durant le développement embryonnaire qui allonge la taille des télomères. Attention toutefois : « *S'injecter de la télomérase, c'est typiquement ce qu'il ne faut pas faire* », prévient Éric Gilson. Car le raccourcissement des télomères joue un rôle important en nous protégeant notamment des cancers et autres stress cellulaires. « *S'il y a un risque oncogénique, l'organisme sera plus vite alerté si les télomères sont courts*, poursuit-il. *Cela peut éviter une prolifération cancéreuse rapidement. Alors qu'avec des télomères longs, il y aura plus de divisions avant que l'alerte ne soit donnée. La cellule aura donc le temps d'accumuler plus de mutations cancéreuses.* » Éric Gilson propose donc une nouvelle approche, ciblant les protéines du télomère sans

Les 5 clés du vieillissement cellulaire



BRUNO BOURGEOIS

Hormis l'arrêt de la division cellulaire, qui génère une réaction inflammatoire, tous ces mécanismes causent des dommages directs sur l'ADN, qui s'accumulent avec l'âge.

RECHERCHE

L'offensive des milliardaires

Jeff Bezos, Sam Altman, Peter Thiel et Larry Page (de gauche à droite) financent massivement la recherche contre le vieillissement.

C. KHANNA / AFP - SHUTTERSTOCK/SIPA - C. KHANNA / AFP - J. SULLIVAN / GETTY / AFP

Qu'est-ce que Jeff Bezos (patron d'Amazon), Sam Altman (OpenAI), Peter Thiel (cofondateur de PayPal), et Larry Page (cofondateur de Google) ont en commun, en plus de leurs milliards ? Leur volonté de tuer la mort. Depuis une décennie, les milliardaires investissent massivement dans la recherche contre le vieillissement, en utilisant leur fortune pour créer des instituts de recherche consacrés à ce seul but. Une tendance qui a commencé en 2013 avec Calico (financée par Google) et Unity Biotechnology en 2016 (financée par Thiel et Bezos), et qui prend de la vitesse depuis deux ans avec Retro Biosciences (financée par Sam Altman), et Altos Labs, qui, selon le quotidien britannique *The Guardian*, aurait un budget mirobolant de plus de 2 milliards d'euros grâce aux financements de plusieurs milliardaires, dont Jeff Bezos. De quoi construire trois centres de recherche (deux en Californie et un à Cambridge, au Royaume-Uni) et y attirer les meilleurs chercheurs du domaine, dont Steve Horvath de l'Institut de science Altos Labs : « *Je voulais dépasser le stade de recherche académique pour concevoir des traitements qui puissent vraiment aider les gens d'une façon très concrète,* confie-t-il. *Et pour faire cela, on a besoin de beaucoup de personnes avec une variété de compétences et d'expertises.* »

Pour réunir ces équipes gigantesques, il faut de l'argent. Malgré ces budgets sans précédent, la lutte contre la vieillesse ne va pas assez vite pour certains. Notamment à cause des agences régulatrices, telle l'agence américaine du médicament (FDA). Ne considérant pas le vieillissement comme une maladie, celle-ci refuse tout essai clinique qui puisse mettre en danger quelqu'un en bonne santé, sous prétexte de lui donner quelques années de vie en plus. Selon une enquête parue dans *MIT Technology Review* en mai 2023, un groupe de milliardaires tenterait même de créer un État indépendant sur les belles plages du Monténégro, pour libérer enfin la recherche anti-âge des barrières de la FDA.

Et d'autres décident de devenir eux-mêmes leur propre cobaye. C'est le cas de Bryan Johnson, milliardaire américain qui a dépensé une partie de sa fortune pour concevoir un protocole anti-vieillissement qu'il teste sur lui-même. Tous les jours, il avale une centaine de pilules et suit un régime alimentaire très strict, avec des heures de sport et de luminothérapie. Grâce à son protocole, il affirme avoir rajeuni d'environ une dizaine d'années… mais il refuse que des experts indépendants vérifient son âge biologique.

toucher à leur longueur : « *On peut imaginer des systèmes de ciblage pharmacologique pour s'attaquer seulement aux parties de ces protéines qui sont vraiment délétères, et garder ce qui est bon. Nous pourrions alors augmenter la durée de vie sans accroître les risques de cancer. Nous n'y sommes pas encore, mais c'est la direction qu'on prend.* »

E. GILSON

« En ciblant les protéines des télomères, nous pourrions augmenter la durée de vie sans accroître les risques de cancer »

Éric Gilson, Institut de recherche sur le cancer et le vieillissement, à Nice

S'il est ainsi possible de retarder l'avènement de la sénescence cellulaire, celle-ci arrivera tôt ou tard. Or, ces cellules sénescentes sécrètent des facteurs pro-inflammatoires qui peuvent endommager les cellules avoisinantes, accélérant le processus de vieillissement. « *Le système immunitaire est normalement en charge de supprimer ces cellules. Ces facteurs pro-inflammatoires sont d'ailleurs le signal permettant de les repérer,* précise Jean-Marc Lemaitre. *Mais avec l'âge, le système immunitaire les reconnaît de moins en moins, donc elles s'accumulent et causent en permanence de l'inflammation. Et ces facteurs pro-inflammatoires débordent vers d'autres tissus, dans une sorte de phénomène de contagion qui vieillit tout l'organisme.* »

Pour enrayer ce processus, on peut cibler les cellules sénescentes avec des sénolytiques, des molécules qui dégradent spécifiquement ces cellules. Sur des modèles animaux, elles ont déjà permis de rallonger significativement la durée de vie en bonne santé. « *Ces molécules sénolytiques font déjà l'objet d'essais cliniques aux États-Unis sur des pathologies liées à l'âge* », révèle le chercheur.

La restriction calorique donne un coup de jeune aux cellules

En attendant, des interventions ont déjà montré qu'il était possible de rajeunir les humains. C'est le cas de la restriction calorique : un essai randomisé publié en février 2023 dans le journal *Nature Aging* a montré que diminuer d'environ 15 % l'apport calorique ralentit de 2 à 3 % le vieillissement cellulaire chez des adultes en bonne santé. « *Lorsqu'on fait de la restriction calorique, le manque de nutriments pousse la cellule à en produire. Pour ce faire, elle dégrade les protéines et en fabrique de nouvelles. Cela donne un petit coup de jeune à la physiologie de nos cellules* », détaille Jean-Marc Lemaitre. Et il est possible d'imiter cet effet en utilisant certains médicaments existants, tels que l'antidiabétique metformine : les patients qui en prennent ont moins de cancers, moins de maladies cardio-vasculaires, moins de maladies neurodégénératives et vivent plus longtemps que la majorité des gens qui ne sont pas diabétiques et ne prennent donc pas de metformine. « *Mon collègue aux États-Unis, Nir Barzilai* [directeur de l'Institut de recherche sur le vieillissement au collège de médecine Albert-Einstein à New York, aux États-Unis], *va tester l'efficacité de la metformine sur des non-diabétiques pour voir si, effectivement, ça retarde toutes les pathologies liées à l'âge. C'est dans les tuyaux, ça ne devrait pas tarder,* révèle-t-il. *Avec toutes les recherches en cours, je pense que vivre jusqu'à 120 ans en bonne santé n'est pas un objectif inatteignable.* » ■

LONGÉVITÉ

Les limites biologiques de la vie humaine

Le nombre de centenaires ne cesse d'augmenter : selon l'Ined, la France en aura plus de 30 000 en 2024, contre 8000 en 2000 et 100 en 1900. Pourtant, personne n'a encore dépassé le record des 122 ans de Jeanne Calment en 1997 et la longévité maximale semble stagner depuis. Une étude publiée dans *Nature* en 2016 estime que la vie humaine aurait une limite naturelle à environ 115 ans. Conclusion confirmée par une étude de 2021 dans *Nature Communications*, qui a modélisé les dégâts causés par le vieillissement et leurs effets sur notre capacité de survie : « *Quand on est jeune et en bonne santé, c'est très facile de gérer les stress, mais quand on vieillit, le même niveau de stress nécessitera de plus en plus d'efforts pour revenir à l'équilibre* », expliquait à *Sciences et Avenir* en 2021 l'auteur de l'étude et directeur du laboratoire de Simulation des systèmes biologiques à Moscou (Russie), Peter Fedichev, qui place la limite naturelle vers 120 ans. Une étude publiée en 2018 dans *Science* suggère toutefois que cette limite dépend du nombre de centenaires… Plus ils sont nombreux, plus ils briseraient les records. Sans compter que les technologies anti-âge « *pourraient améliorer notre capacité à ramener les paramètres physiologiques vers l'équilibre,* s'enthousiasme Peter Fedichev. *Avec un tel traitement (qui reste à trouver), la médecine actuelle pourrait être suffisante pour nous garder en vie indéfiniment !* » Pas sûr que ce rêve soit vraiment désirable.

La ville la plus haute du monde, La Rinconada, dans la cordillère des Andes, s'est développée en raison de l'exploitation d'une mine d'or.

L'étonnante adaptation du corps à l'altitude

50 000 personnes vivent à 5300 mètres d'altitude dans la ville de La Rinconada, au Pérou. Des chercheurs français tentent de comprendre comment adultes et enfants s'adaptent à un taux d'oxygène réduit de moitié.

« *Nous pensions qu'il était impossible pour l'être humain de vivre en permanence au-delà de 5000 mètres d'altitude* », avoue le directeur de recherche à l'Inserm Samuel Vergès. Mais ce qu'il découvre à La Rinconada (Pérou) en 2019, avec les autres membres de l'Expédition 5300 qu'il dirige, défie leurs pronostics. Perchée à 5300 m d'altitude, la ville la plus haute du monde recouvre les flancs de montagne de ses toits de tôle grise. Entre les bâtiments, d'étroites rues de terre battue sont arpentées par 50 000 personnes à l'année. Malgré un taux d'oxygène réduit de moitié par rapport au niveau de la mer, des enfants y naissent, y sont scolarisés et y jouent au football, tandis que des adultes y font commerce et, surtout, exploitent les mines d'or à l'origine de l'attractivité de la ville. Une surprise pour les scientifiques sur place qui, bien que rompus à l'altitude, peinent à soutenir un effort physique ou à dormir correctement. Chaque année, depuis, l'équipe intègre de nouveaux membres et remonte à La Rinconada pour comprendre comment ces populations survivent à une altitude aussi extrême.

« *Je m'attendais à des croissances cérébrales altérées par le manque d'oxygène* », raconte la pédiatre au CHU de Grenoble Alexa Garros, qui s'est jointe à la mission pour son édition 2023 consacrée à la santé des enfants autochtones. L'équipe est alors renforcée pour une

nouvelle expédition de trois semaines de quatre physiologistes spécialistes du système cardio-vasculaire, une neuropsychologue, un diététicien, une médecin généraliste et deux infirmières, pour examiner et prodiguer des soins à 262 enfants de La Rinconada. Est-il dangereux de grandir à 5300 m ? Les conclusions sont étonnamment rassurantes. « *Sur le plan clinique, la plupart des enfants sont plutôt en bonne santé, sans carence majeure et avec une croissance cérébrale normale et des compétences motrices et langagières préservées* », résume Alexa Garros, malgré un âge d'acquisition de la marche (18 mois) et de la parole (3 ans) plus tardifs que ce qui est typiquement constaté en France. « *Nous avons néanmoins observé chez certains enfants un potentiel impact négatif sur certaines fonctions cognitives, avec de légers retards neuropsychologiques et des signes clairs d'hypoxie (manque d'oxygène) chronique grave* », tempère la pédiatre. Certains enfants de 8-12 ans présentaient notamment un « hippocratisme digital », ce défaut d'oxygénation qui se manifeste par des ongles épais et courbes. « *En France, on observe cela dans des pathologies cardiaques ou pulmonaires graves* », précise-t-elle, s'inquiétant de leur développement futur. « *À cette très haute altitude, toutes les valeurs que l'on connaît pour évaluer la santé de la population en plaine sont à revoir* », commente Samuel Vergès. D'abord, parce que les populations locales ont reçu de leurs ancêtres des adaptations génétiques leur permettant de pallier au mieux le manque d'oxygène. Ensuite, parce qu'au-delà d'une certaine altitude, même ces avantages générationnels sont insuffisants. « *Jusqu'à 4000 m, le manque d'oxygène est significatif mais encore tolérable pour des gens dont les ancêtres vivaient à ces altitudes,* continue le scientifique. *On a vraiment l'impression qu'il y a une cassure, un effet exponentiel à partir de La Rinconada sur les conséquences sanitaires, qu'on atteint la limite de l'adaptabilité génétique et physiologique humaine.* »

BRUNO BOURGEOIS

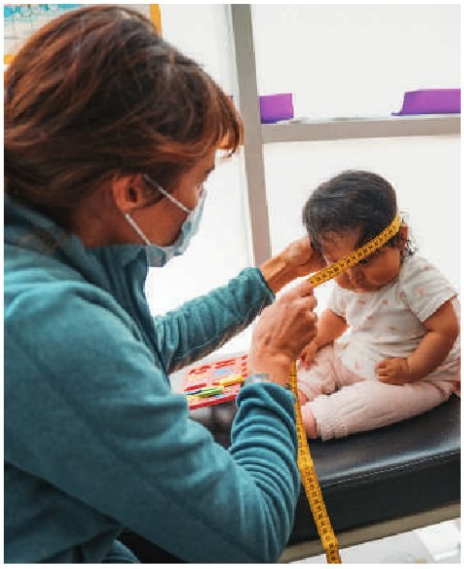
Un cœur beaucoup plus épais à droite qu'à gauche

Les échographies cardiaques montrent ainsi dès l'enfance un cœur beaucoup plus épais à droite qu'à gauche, une caractéristique absente des habitants des plaines en bonne santé. « *Cela témoigne d'un remodelage du cœur en réponse à une augmentation de pression dans l'artère pulmonaire, conséquence directe de l'altitude et du manque d'oxygène* », explique Stéphane Doutreleau, physiologiste, cardiologue et membre de l'Expédition 5300. Si le cœur doit pomper plus fort, c'est que le sang des habitants de La Rinconada est épaissi par une production très élevée de globules rouges, les cellules sanguines chargées du transport de l'oxygène. Là où le volume sanguin du tout-venant est composé à 40 % de globules rouges, ce taux monte à 56 % à Puno, la ville voisine de La Rinconada, située à près de 4000 m. Bien que cette valeur dépasse un peu celle d'un athlète très entraîné, elle est sans commune mesure avec les taux « *hallucinants* » — selon Samuel Vergès — de 80 à 85 % relevés à La Rinconada. Ce sont « *les plus hautes valeurs du monde* », affirme-t-il. Leur sang est si épais qu'il bouche les machines d'analyse, et les scientifiques peinent à le prélever… « *Si nous*

TRAITEMENTS

Améliorer la tolérance à l'hypoxie

Dès 2020, les scientifiques de l'Expédition 5300 ont proposé aux malades de La Rinconada deux traitements susceptibles d'améliorer la tolérance à l'hypoxie : l'atorvastatine et l'acétazolamide. La première molécule est de la famille des statines, prescrites pour lutter contre l'excès de cholestérol et protectrices des conséquences cardio-vasculaires. La seconde est un stimulateur de la ventilation généralement prescrit de manière transitoire aux alpinistes.
En seulement trois semaines, les résultats ont été visibles chez certains hommes atteints du mal chronique des montagnes. Si les statines n'ont pas eu d'effet notable, l'acétazolamide, en revanche, a permis une augmentation de l'oxygénation du sang de plus de 13 % et une diminution du volume de globules rouges de 5 %, d'après les résultats publiés en 2023. Avec pour conséquence une diminution globale du volume sanguin qui a soulagé l'organisme des malades. « *L'acétazolamide a permis d'améliorer les symptômes d'intolérance à l'altitude* », conclut Samuel Vergès, directeur de recherche à l'Inserm. Reste à confirmer cette efficacité sur le long terme, dont le suivi a été interrompu par la pandémie de Covid-19 en 2020. « *Certains habitants poursuivent le traitement et les retours semblent confirmer qu'il pourrait être adapté pour le traitement du mal chronique des montagnes* », avance le chercheur.



Des médecins de l'Expédition 5300 effectuent des consultations auprès des habitants. Si les examens montrent chez la majorité des enfants une croissance cérébrale normale, certains souffrent en revanche d'un manque d'oxygène chronique et les échographies cardiaques mettent en évidence un ventricule droit hypertrophié.

nous transfusions ce sang, nous ferions un AVC [accident vasculaire cérébral] *en quelques minutes à quelques heures* », tant l'épaisseur du liquide boucherait nos vaisseaux sanguins, illustre le chercheur. Pour compenser cette viscosité extrême, le volume sanguin des habitants de La Rinconada est très important, jusqu'à 10 litres, contre 4 à 6 en plaine ! Cette grande quantité de sang très visqueux entraîne la dilatation des vaisseaux sanguins au maximum de leur capacité. « *Dans les plaines, des résultats de ce type enverraient quelqu'un directement à l'hôpital* », relève Samuel Vergès. Les habitants de La Rinconada n'en sortent pas indemnes pour autant. Ils sont 25 % à développer des symptômes pathologiques du mal chronique des montagnes, contre 5 à 10 % des personnes vivant entre 3500 et 4000 m d'altitude. Ces symptômes comprennent un essoufflement anormal, des palpitations, maux de tête, acouphènes ou un sommeil perturbé. Or, ce sont chez ces personnes atteintes par ces troubles que les scientifiques retrouvent la plus forte viscosité sanguine. « *Ce mal chronique des montagnes est probablement un premier signe de cette intolérance à l'altitude qui peut déboucher sur des accidents plus graves, comme des problèmes cardiaques ou des AVC* », analyse Samuel Vergès.

F. GUÉNET/DIVERGENCE

« Si nous nous transfusions ce sang, nous ferions un AVC en quelques heures »

Samuel Vergès, directeur de recherche à l'Inserm

Pouvoir évaluer au plus juste le manque de fer chez les enfants

Si le premier objectif des scientifiques français était une compréhension théorique des adaptations du corps humain à l'altitude, ils ont déjà proposé une aide médicale aux populations locales *(lire l'encadré p. 74)*. Une première, qui conduit les membres de l'Expédition 5300 à souhaiter la création d'un centre de santé et de recherche permanent à La Rinconada. D'ici là, ils seront dès octobre de retour dans la ville, mais aussi à Cuzco (3400 m d'altitude) et Juliaca (3800 m) afin de prolonger l'examen des enfants vivant en haute altitude et les comparer à ceux de Lima, en plaine. En particulier, les chercheurs espèrent évaluer l'importance de l'anémie (manque de fer) chez ces enfants. Le fer est en effet essentiel pour produire de nouveaux globules rouges. « *Le gouvernement péruvien supplémente les enfants en fer dans toutes les écoles, mais, les données sont encore peu solides sur la prévalence de l'anémie* », explique Samuel Vergès. Or, un surplus de fer peut aussi causer des problèmes de santé, notamment digestifs. Mais l'estimation de l'anémie, qui se fait par dosage de l'hémoglobine, est très difficile chez ces enfants pour lesquels les normes sont différentes. « *Nous aimerions apporter des éléments diagnostiques pour supplémenter uniquement ceux qui en ont besoin* », conclut Samuel Vergès. Du médical à l'humanitaire, la ville la plus haute du monde n'a pas fini de captiver les scientifiques. ■

Camille Gaubert

Photos : Agence Perceptiom - Axel Pittet

La moutarde, une graine qui a du piquant

L'un des condiments préférés des Français a l'avantage d'être peu gras et riche en antioxydants.

Cultivée depuis l'Antiquité et intéressante d'un point de vue nutritionnel, la moutarde forte ou douce est l'un des condiments préférés des Français, qui en consomment 1 kg par an et par personne (contre 805 grammes pour les Allemands). Omniprésent dans les cuisines, indispensable lors des pique-niques, ce condiment appartient à la même famille (brassicacées) que le colza et les choux. Emblématique de la Bourgogne depuis le XVIIIe siècle, la moutarde de Dijon est pourtant élaborée pour 80 % à partir de graines importées du Canada. Cette situation a d'ailleurs conduit à une pénurie transitoire dans les rayons en 2021, en raison d'une forte sécheresse outre-Atlantique.

Trois principales espèces de graines

Il existe une quarantaine d'espèces de plants de moutarde dont trois types, issus des genres *Sinapis* et *Brassica*, sont principalement cultivés. Les graines brunes (*Brassica juncea*) et noires (*B. nigra*) servent à la production de la moutarde fine de Dijon, forte et extraforte. Elles sont mélangées à du vinaigre de vin ou du verjus (1), de l'eau et du sel, avant d'être broyées (*a contrario* de la **moutarde à l'ancienne**) puis finement tamisées afin d'obtenir une pâte parfaitement lisse. La moutarde douce est obtenue à partir d'un mélange de graines brunes ou noires et jaune pâle (*Sinapis Alba*).

À noter que l'appellation « moutarde de Dijon » encadre spécifiquement la méthode de fabrication, et non l'origine géographique des graines. Seule la moutarde de Bourgogne IGP est

6000 tonnes

de graines de moutarde ont été récoltées en 2022 en Bourgogne, contre 4000 en 2021.

(SOURCE : ASSOCIATION MOUTARDE DE BOURGOGNE.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

MOUTARDE À L'ANCIENNE Élaborée à partir de graines grossièrement broyées après macération. Elle est naturellement moins piquante que la moutarde fine.

MYROSINASE Enzyme retrouvée principalement dans les plantes de la famille des brassicacées (choux, radis, raifort, cresson, etc.) et impliquée dans les mécanismes de défense de ces végétaux contre les prédateurs.

SULFITES Composants chimiques ajoutés comme conservateurs et antioxydants (pour empêcher le brunissement) à diverses denrées alimentaires (fruits secs, boissons alcoolisées, vinaigre...).

fabriquée à partir de graines produites en Bourgogne et de vin blanc aligoté de cette même région.

Moins grasse que la mayonnaise

Outre des protéines (7 %), la moutarde contient 11 % de lipides, principalement des acides gras mono-insaturés, dont l'acide oléique. La valeur calorique de ce condiment reste donc modérée : 152 kcal pour 100 g, soit 23 kcal par cuillère à soupe (15 g), contre 97 kcal pour 15 g de mayonnaise de la marque Bénédicta. À noter toutefois, les moutardes mi-fortes sont additionnées d'huile végétale (compter alors 33 % de lipides pour la mi-forte d'Amora). Son rival le ketchup renferme, lui, jusqu'à 10 fois plus de sucre. Mais certaines moutardes douces ou aromatisées ne sont pas en reste : celle d'Amora affiche 4,3 g de sucre pour 100 g, contre 1,9 g/100 g pour la moutarde fine de Dijon de la marque Maille.

Elle apporte des nutriments en petite quantité...

La moutarde renferme du calcium (110 mg/100 g de moutarde à l'ancienne), du phosphore, du potassium ainsi que du sélénium (70 microgrammes/100 g de moutarde à l'ancienne). On note aussi la présence de vitamine B9, impliquée dans le fonctionnement des systèmes nerveux et immunitaire, et de vitamine K1, qui intervient dans la coagulation sanguine et joue un rôle dans la synthèse osseuse. Néanmoins, ces nutriments contribuent modérément à la couverture des besoins quotidiens au regard des faibles quantités de moutarde consommées. Attention, en revanche, à sa teneur en sel : 6,3 g/100 g, soit près de 1 g par cuillère à soupe (2).

... et des antioxydants

Les graines de moutarde contiennent des glucosinolates, des composés soufrés : la sinigrine, responsable du goût piquant et retrouvée dans les graines brunes (*B. juncea*), et la sinalbine, présente principalement dans les graines jaunes (*S. alba*) (3). Ces deux composés soufrés seraient mieux préservés lors de la fabrication de la moutarde à l'ancienne que dans celle de la moutarde de Dijon (4). Les glucosinolates sont hydrolysés par une enzyme, la myrosinase. Résultat : une production d'isothiocyanate d'allyle, la fameuse molécule aromatique qui fait « monter la moutarde au nez ». Les glucosinolates auraient diverses propriétés pharmacologiques (hypoglycémiante, antioxydante, anti-inflammatoire, antibactérienne, etc.) (5), ainsi que des effets hépatoprotecteurs contre la stéatose hépatique non alcoolique, observés chez le rat (6).

Elle renferme certains additifs

La moutarde industrielle n'est pas indemne de certains additifs, dont le disulfite de potassium (E224), un conservateur qui préserve sa couleur après l'ouverture du pot. Elle renferme aussi de l'acide citrique (E330), un exhausteur de goût également utilisé comme régulateur d'acidité pour empêcher le développement de microbes et de bactéries et permettre sa conservation au réfrigérateur encore un an après ouverture. La gomme xanthane (E415) est, elle, ajoutée pour ses propriétés épaississantes et gélifiantes. Les saveurs (basilic, estragon, poivre vert, etc.) peuvent aussi être des arômes artificiels. ■

Sylvie Boistard

DR HABIB CHABANE* Allergologue à Paris

On peut y être allergique

« La moutarde est l'un des 14 allergènes à déclaration obligatoire, au même titre que l'arachide et les protéines de lait de vache. L'allergène majeur de la moutarde est une protéine de stockage (albumine 2S) présente dans la graine. Seule l'éviction alimentaire permet d'éviter les récidives. Environ un tiers des allergiques à la moutarde réagissent au pollen d'armoise. Certaines réactions (rhinite, difficultés respiratoires, maux de tête, etc.) peuvent aussi être liées à une « intolérance » aux sulfites présents dans la moutarde ».

* Auteur des *Allergies alimentaires*, Vigot, 2017.

(1) Biologically active compounds in mustard seeds: a toxicological perspective, Lietzow J. et al., *Foods*, 2021.

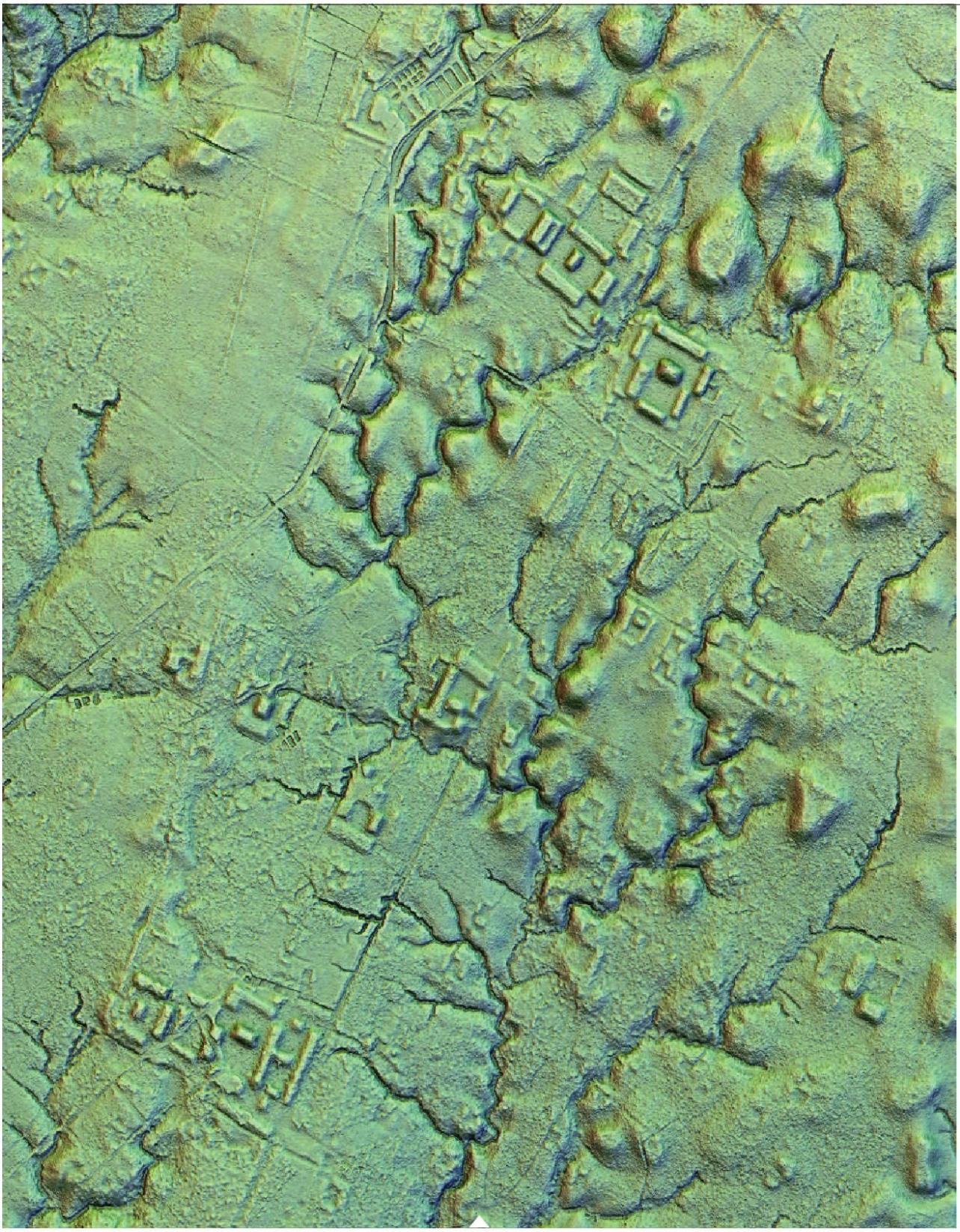
(2) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(3) Glucosinolates and Omega-3 Fatty Acids from Mustard Seeds: Phytochemistry and Pharmacology, Das G. et al., *Plants*, 2022.

(4) The effect of processing on the glucosinolate profile in mustard seed, Cools K. et al., *Food Chemistry*, 2018.

(5) Sinigrin and its therapeutic benefits, Mazumder A. et al., *Molecules*, 2016.

(6) Glucosinolates Extracts from Brassica juncea ameliorate HFD-Induced non-alcoholic steatohepatisis, Sheu M-J. et al., *Nutrients*, 2023.



ANTOINE DORISON/ STÉPHEN ROSTAIN / AP / SIPA

Dissimulée sous la végétation, la topographie de la « cité perdue », dont la fondation remonte à 500 ans avant notre ère, a été révélée grâce aux images lidar (ici le site de Copueno, dans la vallée de l'Upano, montrant une route principale traversant une zone urbaine).

Amazonie

La civilisation oubliée de l'Upano

Le survol d'une zone de jungle au sud de l'Équateur a livré, grâce à la technologie du lidar, le plus vaste réseau urbain de la région amazonienne : cinq villes, dix villages, répartis sur 300 km². Mais cette civilisation n'a laissé aucune trace écrite. Un défi pour les archéologues qui reconnaissent cette culture grâce aux céramiques fabriquées avec la cendre volcanique de la région.

Par Yoanna Herrera

Ce n'est pas encore la mythique cité d'or d'El Dorado, mais la canopée de la forêt de l'Équateur vient de livrer un trésor exceptionnel : le plus gros et le plus ancien réseau urbain de la région amazonienne. Cette découverte, qui a fait la une de la revue *Science* le 11 janvier, est l'accomplissement de nombreuses années de recherches pour l'archéologue français Stéphen Rostain, directeur de recherche CNRS au laboratoire des Amériques de l'université Paris-I Panthéon-Sorbonne. Truelle en main, il a consacré toute sa carrière à mettre au jour les archives des sols amazoniens. Mais il ne s'est jamais autorisé à rêver un tel paysage : cinq villes, dix villages, soit plus de 6000 monticules rectangulaires sur une étendue de 300 kilomètres carrés — une surface équivalente à celle des métropoles de Marseille et Lyon réunies. Avec d'autres chercheurs, il confirme enfin l'intuition du navigateur et explorateur espagnol du XVIe siècle, Francisco de Orellana, qui décrivait l'existence de grandes villes fortifiées le long des rivages de l'Amazonie où les gens pratiquaient l'agriculture. Baptisée du nom de la rivière Upano, cette civilisation n'a laissé aucune trace écrite. Les archéologues reconnaissent cette culture grâce aux céramiques fabriquées avec la cendre volcanique de la région et décorées de motifs géométriques peints. Leur provenance eth-

BRUNO BOURGEOIS

nique et géographique demeure une question sans réponse.
Jusqu'alors, l'archéologue imaginait que la végétation de la vallée de l'Upano, sur le piémont oriental de la cordillère des Andes, ne cachait qu'une centaine de structures archéologiques éparses dont l'occupation remontait à 500 avant J.-C. Il aura fallu de nombreuses années de recherches pour obtenir la carte de cette cité perdue. L'existence de plusieurs monticules d'origine anthropique est connue depuis la fin des années 1970 grâce au missionnaire Pedro Porras. Passionné d'archéologie, le religieux a fait les premières fouilles non loin du volcan Sangay, au nord des rives de l'Upano. Mais ce n'est qu'à partir des années 1990, à l'initiative de l'anthropologue Philippe Descola *(lire l'interview p. 82)*, que l'archéologue équatorien Ernesto Salazar González et Stéphen Rostain ont mené de véritables missions scientifiques.

STÉPHEN ROSTAIN

L'archéologue Stéphen Rostain sonde les sols amazoniens depuis trente ans (ici lors de la découverte d'une jarre en céramique dans la vallée de l'Upano).

Une maquette numérique avec les modifications du paysage

Botanistes, géologues et archéologues se sont rendus sur place pour essayer de comprendre les modes de vie des sociétés de la jungle. Mais avec peu de vestiges funéraires et aucune trace écrite, les chercheurs étaient encore loin de compléter le puzzle. Stéphen Rostain s'est alors dit qu'il fallait *« déshabiller la terre »* à l'aide du lidar et a fait appel pour cette mission à Antoine Dorison, deuxième auteur de l'étude, spécialiste en archéologie du paysage. *« Nous avons scanné la zone avec des tirs lasers,* résume celui-ci. *Cette technologie fonctionne comme les petits lasers dont on se sert dans le secteur de la construction pour mesurer les distances, mais à une très grande échelle. »* L'avantage de cette méthode est que la lumière est capable de se faufiler dans les trous de la canopée et permet ainsi de dresser la topographie qui se cache sous la végétation. Après de longues heures de traitement des données, Antoine Dorison réussit enfin à avoir une maquette numérique qui traduit les modifications du paysage. *« Quand j'ai vu les images, tout ce que j'ai pu dire c'est waouh ! »* se remémore Stéphen Rostain. *« Cette étude pionnière permet de relier tous les constats qui ont été faits par les archéologues dans le passé. Nous sommes au début d'une série de découvertes extraordinaires »*, abonde Manuel Arroyo-Kalin, géoarchéologue à l'University College de Londres (Royaume-Uni), qui n'a pas participé au projet. La carte numérique offre pour la première fois une vision régionale, qui complète les quelques fouilles faites dans les décennies précédentes.
« Avant, j'avais un site, et maintenant c'est une cité », s'émerveille Stéphen Rostain. *« Dans cette étendue,* détaille Antoine Dorison, *on s'aperçoit que les plateformes sont agglomérées et interconnectées par un réseau viaire. »* Autrement dit, il s'agit de cinq villes distinctes

ÉCHANGES

Amazoniens et Mésoaméricains reliés par les routes du cacao

Dans la culture populaire, l'économie du cacao est souvent associée aux cultures mayas. Mais, en réalité, elle puise ses origines dans l'Amazonie équatoriale. Les preuves les plus anciennes de la domestication de cette plante ont été recueillies sur le site de Santa Ana-La Florida (au sud de l'Équateur) et remontent à environ 5300 ans. Soit 1500 ans avant les Olmèques — qui ont précédé les Mayas. Si nous ne savons pas exactement comment le cacao a été transmis de l'Amérique du Sud à l'Amérique centrale et au Mexique, pour Sonia Zarrillo, archéobotaniste et chercheuse à l'université de Colombie-Britannique (Canada), l'hypothèse privilégiée est celle de l'échange ou commerce entre un groupe et un autre de manière progressive par des voies terrestres et maritimes. Il est toutefois possible que des restes encore plus anciens soient retrouvés dans les années à venir.

STÉPHEN ROSTAIN

Des terrasses agricoles jouxtaient les habitations, drainées pour cultiver maïs, manioc, haricot ou patate douce. À droite, un pot incisé et peint de la culture de l'Upano.

et d'une dizaine de villages reliés par de véritables routes régionales et locales. Une allée en ligne droite d'au moins 25 kilomètres qui part du site principal lui vaut une comparaison avec des grandes villes antiques comme Teotihuacan, au Mexique, avec sa célèbre allée des morts. Stéphen Rostain n'hésite pas à comparer sa trouvaille aux grandes villes mésoaméricaines caractérisées par leurs bâtisses en pierre. Des petits quartiers résidentiels sont composés d'au plus six maisons, dont il ne reste hélas que les trous des poteaux. Les résidences étaient limitrophes d'espaces destinés à l'agriculture, sortes de jardins potagers. « *Ils creusaient des drains pour évacuer l'eau et cultiver. On appelle ça un champ drainé* », détaille le premier auteur. Dans le passé, des grains d'amidon de maïs, manioc, haricot et patate douce ont été retrouvés dans les outils à moudre des cuisines.

Une société puissante développée à grande échelle

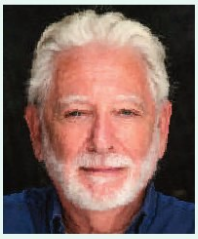
La mise au jour de ce réseau urbain vient confirmer que les sociétés précolombiennes d'Amazonie étaient aussi complexes que variées. Pour réussir à construire un site de cette dimension, les habitants de l'Upano devaient constituer une « *société puissante et développée à grande échelle avec une structuration de sites majeurs comparables à ce que l'on voit en Mésoamérique ou en Moyen-Orient* », commente Guillaume Odonne, écologue et ethnobotaniste au CNRS. Car pour réussir à développer une ville, il faut une société spécialisée : des géomètres, des architectes, des agriculteurs, des artisans et pourquoi pas des prêtres.

Le regard colonial a longtemps empêché d'estimer les populations amazoniennes au même titre que leurs voisins mayas ou incas. Notamment parce que seuls ces derniers ont bâti en pierre et ont donc été considérés comme plus proches des civilisations occidentales. « *Énorme erreur !* s'exclame Stéphen Rostain. *Les habitants de l'Amazonie étaient des terrassiers hors pair. N'ayant pas de roche, ils n'ont pas fait de pyramides comme leurs voisins, mais ont dominé et maîtrisé le travail de la terre comme personne.* » Maisons et centres cérémoniels ont été construits en matériaux périssables comme le bois et le palmier. Leur modèle économique peut être qualifié de « durable » :

MANUEL ARROYO-KALIN

« Avec cette étude pionnière, nous sommes au début d'une série de découvertes extraordinaires »

Manuel Arroyo-Kalin, géoarchéologue à l'University College de Londres (Royaume-Uni)


HANNAH ASSOULINE / OPALE

INTERVIEW

PHILIPPE DESCOLA

ANTHROPOLOGUE, PROFESSEUR ÉMÉRITE AU COLLÈGE DE FRANCE

« La forêt vierge est le résultat d'un travail de transformation par les populations »

Quelle était votre motivation pour lancer un projet archéologique français dans la région ?
Claude Lévi-Strauss a écrit dans *Les Mythologiques* que l'Amazonie est un Moyen Âge dont on ne connaît pas la Rome. Et pour connaître cette Rome — comme il n'y a pas de documents écrits —, l'archéologie est la seule façon de procéder. Le projet a donc démarré lorsque j'étais membre du conseil scientifique de l'Institut français d'études andines. Je défendais depuis longtemps l'idée qu'il fallait développer des recherches archéologiques sur l'Amazonie car il me semble que cette discipline est la nouvelle frontière de ce vaste ensemble.

Vous avez travaillé longtemps dans la région et vous affirmez que « la nature n'existe pas ». Pourquoi ?
La forêt est en grande partie le résultat d'un travail de transformation par les populations qui l'occupent depuis plusieurs millénaires. Ils suppriment, par exemple, la concurrence pour bénéficier des espèces qui leur sont utiles. Et avec cette étude, en effet, on a retrouvé sous la forêt dite vierge les traces d'un système d'occupation très ancien. Mais ce qui posait énormément de questions est le fait de savoir si ce sont des Amazoniens ou des populations andines qui se sont installés sur ce site.

Pourquoi l'urbanisme de ce site est-il si particulier ?
Ce qui est très frappant, ce sont ces chemins rectilignes qui ne correspondent pas du tout à la façon de se déplacer dans un milieu tropical, où l'on suit les crêtes et les chemins des fonds de vallée. Ce tracé rappelle le système de ceque, à Cuzco au Pérou : une organisation sociospatiale bien particulière de cette région qui permettait de relier Cuzco au reste de l'Empire inca.

Est-ce que les populations amazoniennes actuelles descendent de cette culture de l'Upano ?
Non. Il n'y a pas de continuité entre les peuples Jivaro qui sont arrivés sur la forêt équatorienne. On ne peut donc pas utiliser ce que l'on sait sur les populations actuelles pour interpréter les vestiges archéologiques. Mais il y a encore beaucoup de travaux à faire avant de connaître l'organisation sociale de cette ville antique.

Propos recueillis par Y. H.

à la différence d'autres sociétés agricoles, les habitants de l'Upano n'ont pas eu besoin de raser d'énormes surfaces pour cultiver. Les complexes résidentiels et les espaces verts étaient parfaitement imbriqués. Les espaces anthropiques sont très souvent entourés de *terra preta* — ou terre noire —, un sol de couleur sombre, extrêmement fertile. *« C'est le résultat de leur gestion de l'environnement. Ils ont réussi à modifier les propriétés chimiques des sols notamment grâce au brûlis et aux résidus de leurs activités domestiques »*, étaye Manuel Arroyo-Kalin. Ainsi, leurs connaissances traditionnelles leur ont permis d'exploiter cette forêt considérée, à tort, comme sauvage. *« C'est ce qu'on appelle un socio-écosystème : la distribution des espèces comestibles n'est pas aléatoire »*, ajoute Guillaume Odonne. Lorsque les populations ont quitté le site, la végétation a repris sa dynamique de croissance et la forêt s'est reconstituée jusqu'à atteindre un stade de maturité.

Un urbanisme vert avec l'agriculture au cœur de la ville

Les traces de la civilisation de l'Upano disparaissent au milieu du premier millénaire. Les raisons de cette chute restent à éclaircir, mais Stéphen Rostain suit la piste d'une série d'éruptions volcaniques qui ont pu faire fuir la population. *« Nous avons découvert la pointe de l'iceberg. Il reste encore des surprises qui viendront avec le temps »*, promet le chercheur. Si les « cités perdues » suscitent un grand engouement, Antoine Dorison invite à penser au futur : on a devant nous un urbanisme vert avec l'agriculture au cœur de la ville. *« C'est une notion très forte et très intéressante à une époque où on essaye d'effacer les barrières entre la ville et les écosystèmes. Cette vision peut nous servir à réfléchir aux villes de demain »*, tranche-t-il. ■

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

Ce « Rhombot » a été créé à partir d'un fossile de pleurocystitide (en médaillon), un animal marin de la classe des rhombifères qui vivait il y a environ 450 millions d'années.

Des espèces disparues renaissent grâce aux robots

Nouveau domaine de recherche, la paléobionique permet de reproduire des formes de vie éteintes et de les animer grâce à la robotique molle. Objectif des paléontologues : mieux comprendre l'évolution des créatures terrestres.

De ces créatures qui vivaient il y a 450 millions d'années, il ne reste que de fugaces impressions ornant certaines roches de l'ordovicien (-485,4 à -443,4 millions d'années). Juste assez pour imaginer leurs drôles de formes : des cônes, des sphères quasi parfaites ou des sortes de petites massues à tentacules pour la classe des rhombifères, les plus anciens échinodermes connus dont les étoiles de mers, les oursins ou les ophiures sont les représentants actuels. Au sein de ce groupe, les pleurocystitides (2 centimètres) sont considérés comme les premiers organismes pouvant se déplacer activement, à l'aide d'une tige musculaire. Mais comment ? *« Ce sont des animaux, aujourd'hui disparus, pour lesquels il n'existe aucun analogue moderne qui puisse donner des clés pour appréhender leur comportement. Jusqu'à présent, la résolution de ces questions n'était qu'une affaire d'opinion ou de scientifiques, sans aucun moyen de tester des hypothèses concurrentes »*, explique William Ausich, paléontologue à l'université d'État de l'Ohio (États-Unis).
Une approche inédite pourrait enfin apporter des éléments objectifs et scien-

tifiquement valides : la paléobionique. Ce champ de recherche constitue un nouveau domaine de la paléontologie, qui consiste à reproduire les formes de vie ancestrales et à les animer. Le tout grâce à la robotique molle, qui recourt à des matériaux ou à des structures souples ou élastiques pour la construction d'automates. Et ce, dans le but de mieux comprendre l'écologie de ces animaux. *« Jusqu'à ce que les machines à voyager dans le temps soient inventées, nous ne saurons jamais à 100 % comment un organisme éteint s'est comporté, mais la paléobionique offre un moyen de séparer les hypothèses raisonnables des hypothèses déraisonnables, ainsi que l'hypothèse la plus probable parmi les hypothèses raisonnables,* souligne William Ausich. *En plus de comprendre les bases du comportement d'un seul organisme disparu, la paléobionique peut aussi fournir un moyen d'aider à comprendre les facteurs morphologiques et comportementaux de l'évolution.* »

Un robot composé d'un corps dur et d'une tige flexible

C'est ainsi qu'est né le Rhombot, dans les laboratoires de l'université Carnegie Mellon, à Pittsburgh (États-Unis). Sa forme est calquée sur celle des fossiles de pleurocystitides connus. Le robot est composé d'un corps dur, appelé thèque, et d'une tige flexible. Un soin tout particulier a été apporté à la reproduction de cet appendice. *« L'organisation microstructurale de la tige de ces échinodermes fossiles est très similaire à celle observée dans les articulations musculaires des échinodermes vivants* [comme celles qui actionnent les bras des étoiles de mer et des ophiures]. *Ces données suggèrent ainsi fortement que la tige des pleurocystitides était musclée* », précise Przemyslaw Gorzelak, de l'Institut de paléobiologie de l'Académie polonaise des sciences. Pour fabriquer cet analogue musculeux, les chercheurs ont utilisé une combinaison d'éléments imprimés en 3D et de polymères à mémoire de forme. *« Ils nous permettent de le contrôler et de l'actionner relativement rapidement et avec un minimum d'électronique externe* » indique Philip LeDuc, professeur de génie mécanique à l'université Carnegie Mellon.

Une fois animé, le robot a été testé en différentes configurations afin de comprendre quelle était la stratégie de locomotion des pleurocystitides. Les chercheurs savaient déjà qu'ils se dépla-

« Orobot », un robot « dur », imite un petit animal vieux de 290 millions d'années.

ALESSANDRO CRESPI/EPFL LAUSANNE

LOCOMOTION

Dans les pas d'« Orobates pabsti »

L'Orobot est un squelette robotisé composé de 28 servomoteurs. Il n'entre pas tout à fait dans le champ de la paléobionique qui repose sur des robots mous, mais dans celui de la paléorobotique car il utilise des éléments en dur. Il a toutefois été conçu pour coller aux proportions d'*Orobates pabsti*, un animal de la taille d'un petit chien, mangeur de plantes, qui vivait il y a environ 290 millions d'années. Grâce à lui, les paléontologues ont pu tester la pertinence de différents modèles de locomotion inspirés de la marche de reptiles modernes (iguanes, salamandres et crocodiliens) et des pistes d'empreintes fossilisées laissées par l'animal. Objectif : déterminer lequel était le plus adapté au fossile, en tenant compte des contraintes biomécaniques et cinématiques. Ainsi, avant d'arriver à trouver le pas qui correspondait le mieux à *Orobates pabsti*, les scientifiques ont comparé des centaines de démarches possibles en variant la hauteur des pattes ou l'amplitude des articulations. De leur étude, publiée dans la revue *Nature*, il ressort que ce tétrapode se déplaçait plutôt à la façon d'un caïman, en se tenant assez haut sur pattes, contrairement à des animaux comme les salamandres. Ce qui est la caractéristique d'une marche évoluée dont les scientifiques ne pensaient pas qu'elle puisse être apparue si tôt dans l'évolution des créatures terrestres.

çaient sur les fonds marins au moyen de la tige musculaire, qui poussait le corps vers l'avant. Grâce au Rhombot, l'équipe a pu démontrer que les mouvements de balayage larges étaient probablement la technique la plus efficace. Et que l'augmentation de la longueur de la tige procurait un accroissement considérable de la vitesse de l'animal, sans l'obliger à consommer plus d'énergie. *« Au début des tests, nous ne savions pas si la longueur de la tige avait une influence positive ou négative. Et même des simulations précises n'auraient pas permis de comprendre avec ce degré de raffinement le rôle de la tige. La construction de ce robot nous a beaucoup appris dans un grand nombre de domaines »*, note Philip LeDuc.

Décrypter la sortie des eaux des premiers tétrapodes

Ce premier robot en présage-t-il d'autres ? Selon les scientifiques, cette méthode est prometteuse. *« Donner une nouvelle vie à quelque chose qui existait il y a près de 500 millions d'années est passionnant en soi,* estime Philip LeDuc. *Mais cela nous aidera surtout à développer de nouveaux robots dotés de fonctions qui ne sont pas utilisées par les animaux actuels. »* La paléobionique offre en effet la possibilité de découvrir des *« conceptions biologiques utiles qui ont été très efficaces à un moment donné de l'histoire de la vie mais qui ont peut-être été perdues ou abandonnées en raison de changements environnementaux ou de la disparition des espèces qui les possédaient »*.

L'équipe de Carnegie Mellon prévoit maintenant d'étudier la locomotion des tétrapodes, les premiers animaux à être passés du milieu aquatique au milieu terrestre. La « sortie des eaux » constitue l'un des changements les plus profonds dans l'histoire évolutive. Diverses adaptations ont facilité l'apprentissage de la marche sur la terre ferme. Elles sont notamment fécondes chez les amniotes, les vertébrés terrestres. *Orobates pabsti* appartient à ce groupe. Son fossile a été étudié en 2019 par une équipe de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) grâce à l'Orobot, ce qui a permis de comprendre comment il se déplaçait *(lire l'encadré ci-contre)*. La prochaine réalisation des ingénieurs de Canergie Mellon doit se rapprocher encore plus de la démarche des premières créatures qui se sont aventurées hors de l'eau, il y a 350 millions d'années.

Outre la locomotion, la robotique peut également nous informer sur le comportement d'espèces disparues et expliquer certains de leurs attributs. Comme la présence d'ailes et de plumes chez les dinosaures non volants, dorénavant attestée par de nombreux fossiles tel le *Caudipteryx*, un prédateur à deux pattes de la taille d'un paon qui vivait il y a environ 124 millions d'années. Puisqu'elles ne permettaient pas le vol, à quoi pouvaient-elles bien servir ? Une équipe sud-coréenne a récemment éprouvé une hypothèse ancienne selon laquelle les ailes servaient en fait à effrayer les proies (des insectes en l'occurrence), les poussant à sortir de leur cachette pour, dès lors, constituer une cible bien plus simple à gober. Afin de tester cette hypothèse, les chercheurs ont donc construit le Robopteryx, un robot aux ailes mobiles équipées de neuf moteurs. Les tests réalisés indiquent bien que le mouvement des proto-ailes et des plumes de la queue incitent les sauterelles à fuir, dévoilant ainsi leur position au prédateur ailé. *« Notre Robopteryx s'aligne sur le concept de la paléobionique : sa taille et ses proportions sont dérivées des archives fossiles. Et nous l'avons utilisé pour étudier le comportement d'un organisme disparu depuis longtemps. Il illustre une approche innovante et interdisciplinaire qui contribue de manière significative à une compréhension plus approfondie des modèles évolutifs de l'histoire de la vie sur Terre »*, explique Jinseok Park, de l'université nationale de Séoul (Corée du Sud), un de ses concepteurs. *« Ces nouveaux robots donnent ainsi un nouveau sens à la recherche paléobiologique »*, se réjouit William Ausich. ■ **Joël Ignasse**

JINSEOK PARK

« Robopteryx », équipé de 9 moteurs, a permis d'expérimenter la fonction stratégique des ailes chez des dinosaures non volants comme le « Caudipteryx ».

WILLIAM AUSICH

« La paléobionique peut fournir un moyen de comprendre les facteurs morphologiques et comportementaux de l'évolution »

William Ausich, paléontologue à l'université d'État de l'Ohio (États-Unis)

Oppenheimer, le physicien éclipsé par la bombe

Avant de prendre la tête du projet Manhattan, Robert Oppenheimer était un chercheur et un enseignant réputé et respecté. Il contribua notamment à deux découvertes majeures — le positon et les trous noirs — sans toutefois en récolter les lauriers.

Par Ivan Kiriow

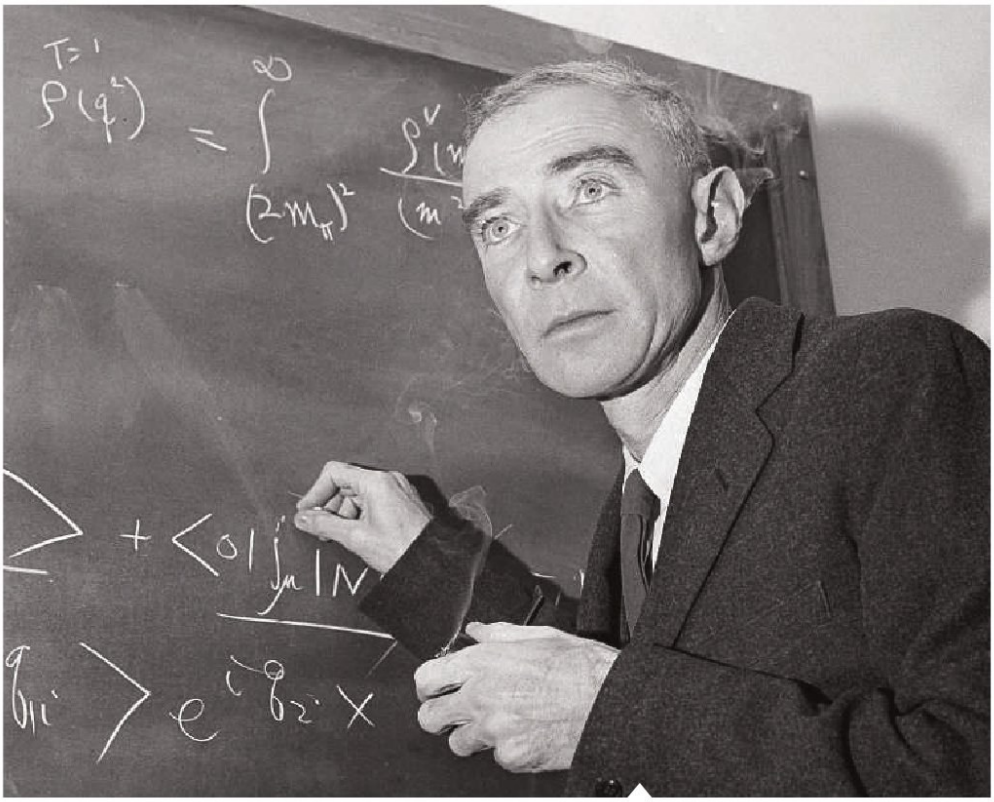
Celui qui fut l'un des scientifiques les plus célèbres de l'après-guerre est revenu sur le devant de la scène en 2023 à la faveur du monumental biopic que lui a consacré le réalisateur Christopher Nolan. Mais c'est encore comme « *le père de la bombe atomique* » que l'on présente J. Robert Oppenheimer, directeur scientifique du projet Manhattan, qui a supervisé la construction des premières armes de destruction massive de l'histoire. Ce raccourci commode égratigne déjà la réalité : Oppenheimer n'a pas « inventé » la bombe A, il n'a pas découvert le phénomène de fission nucléaire sur lequel elle est fondée, ni mis au point ses mécanismes de détonation. À partir de sa prise de fonction à la tête du « site Y » (nom de code de la ville-laboratoire de Los Alamos au Nouveau-Mexique (États-Unis), où le « Gadget », ainsi qu'avait été baptisée la bombe, fut élaboré dans le plus grand secret), il est devenu un administrateur efficace, le leader et le catalyseur de la plus extraordinaire concentration de cerveaux scientifiques jamais constituée.

Or, on oublie souvent qu'avant de devenir le « chef » de ces savants d'élite, Robert Oppenheimer était lui-même un physicien brillant, chercheur et enseignant réputé et respecté. Il avait notamment contribué à « importer » aux États-Unis la révolution de la mécanique quantique dont il avait partagé en Europe l'émergence et le triomphe. Pur théoricien , il avait suivi l'enseignement de Max Born à Göttingen (Allemagne), de Wolfgang Pauli à Zurich (Suisse), et côtoyé de jeunes collègues géniaux comme Paul Dirac ou Werner Heisenberg, ainsi que celui qui fut l'idole de toute sa vie : Niels Bohr.

Dès son retour aux États-Unis, deux des plus grandes universités californiennes, CalTech et Berkeley, se partagent l'enseignement d'« Oppie » (ainsi que l'appelaient ses amis et ses étudiants préférés). Adulé par les jeunes doctorants qu'il prend sous son aile, il cosigne avec plusieurs d'entre eux de nombreux articles scientifiques sur des sujets variés. Cette période californienne sera pour lui la plus féconde sur le plan de la recherche. Après avoir apporté sa pierre à l'édifice de la théorie quantique, il va l'appliquer à des domaines aussi divers que prometteurs. Sans pouvoir détailler ici ses principales contri-

IVAN KIRIOW

Journaliste scientifique et docteur en histoire des sciences, Ivan Kiriow est l'auteur de *L'Énigme Robert Oppenheimer* (Larousse, 2023).



JOHN ROONEY/AP/SIPA

Julius Robert Oppenheimer (1904-1967), dans son bureau de l'Institut d'études avancées de Princeton (États-Unis), le 15 décembre 1957.

Il a contribué à importer aux États-Unis la révolution de la mécanique quantique dont il avait partagé en Europe l'émergence et le triomphe

butions à la physique du XX^e siècle, nous évoquerons deux découvertes majeures auxquelles il a contribué sans en récolter les lauriers : le positon et les trous noirs.

Il développe dès 1925 une obsession pour l'électrodynamique quantique

Depuis sa rencontre avec Paul Dirac à Cambridge en 1925, Oppenheimer avait été fasciné par son jeune collègue, physicien de génie et mathématicien virtuose. Il avait surtout développé une véritable obsession pour une théorie que Dirac avait élaborée en 1928 : l'électrodynamique quantique (abrégée en *« QED »* en anglais), application de la mécanique quantique aux mouvements des électrons et aux phénomènes électromagnétiques. S'il était ébloui par cette première tentative visant à concilier physique quantique et théorie de la relativité (les électrons se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière), il avait très vite acquis la conviction que quelque chose clochait dans ces équations. Devenu professeur, il s'était de nouveau penché sur le sujet avec Milton Plesset, un de ses « protégés ».

Publié en 1933 avec Plesset, « Sur la production de l'électron positif » inaugure une série d'articles dans lesquels Oppenheimer, en collaboration avec plusieurs de ses étudiants, met au jour les failles de la théorie de Dirac. Il montre notamment qu'elle impliquerait l'existence d'une particule de la même masse que l'électron mais qui serait chargée positivement. Or, Oppenheimer y voit une preuve par l'absurde des limites de la QED. Il s'avéra qu'il avait à la fois tort et raison. La théorie de Dirac devait bien être améliorée. Ce travail de longue haleine, baptisé « renormalisation de la QED », sera mené après la guerre par deux jeunes physiciens avec lesquels Oppenheimer avait travaillé, Julian Schwinger et Richard Feynman, et parallèlement par le Japonais Sin-Itiro Tomonaga. Ces travaux vaudront à ces trois chercheurs de partager en 1965 le prix Nobel de physique. Mais Oppenheimer se trompait sur l'existence de l'« électron positif », qui fut rebaptisé « positron » puis « positon ». Détectée fortuitement en 1932 par Carl Anderson dans les rayons cosmiques, cette nouvelle particule dévoila l'existence de l'antimatière, sorte de double en négatif

de la matière connue jusqu'alors. Ne croyant pas à son existence, Oppenheimer passa à côté de cette découverte pour laquelle Anderson reçut le prix Nobel de physique en 1936.

C'est à la fin de ces années 1930 si fructueuses en découvertes qu'Oppenheimer aborda un des thèmes de recherche les plus intéressants, bien qu'il fallût encore des années pour que la communauté scientifique en mesure l'importance. Il s'agissait de sa première incursion dans un domaine alors nouveau pour lui : l'astrophysique. Il se pencha sur les transformations subies par les étoiles massives en « fin de vie », lorsqu'elles ont épuisé leurs réserves de combustible (l'hydrogène) et qu'elles se ramassent sur elles-mêmes sous l'effet de leur propre gravité. Dans les deux premiers d'une série de trois articles sur le sujet, publiés entre 1938 et 1939, il étudiait ce qu'on pensait être alors l'ultime stade de cette évolution : les étoiles à neutrons.

Mais c'est surtout le dernier volet de ce triptyque qui suscite aujourd'hui encore l'admiration des physiciens… et qui aurait sans doute pu lui valoir le Nobel s'il avait vécu assez longtemps pour jouir de cette reconnaissance. Car le phénomène étrange et fascinant qu'il y décrit en compagnie d'Hartland Snyder est depuis passé du stade de la spéculation théorique à celui de « star » de la physique. Poussant la densification de la masse stellaire au-delà de celle des étoiles à neutrons, cette « singularité » où le temps s'étire à l'infini et qui attire à elle jusqu'à la lumière, recevra quelques années plus tard un nom inspiré par une geôle de Calcutta, en Inde, dont on disait que les détenus ne sortaient jamais vivants : « trou noir » !

SPL/SUCRE SALÉ

L'essai Trinity, premier test d'explosion d'un engin atomique, le 16 juillet 1945 au Nouveau-Mexique (États-Unis), par les physiciens du projet Manhattan.

Le 1er septembre 1939, la physique cède la place à l'histoire

En appliquant les équations de la relativité générale d'Einstein à ce cas limite du bestiaire cosmique, Oppenheimer et Snyder venaient sans le savoir d'ouvrir un des chapitres les plus glorieux de la physique du XXe siècle. Mais leur travail, qui eut déjà à l'époque un retentissement limité — on n'y voyait qu'un brillant exercice mathématique sans en soupçonner les implications dans la compréhension de l'Univers — , fut de plus éclipsé par un événement aux répercussions immédiates et dramatiques : le jour même de la parution de leur article, le 1er septembre 1939, les journaux du monde entier annonçaient l'invasion de la Pologne par les troupes du IIIe Reich, marquant le début de la Seconde Guerre mondiale. Pour Oppenheimer, la physique venait de céder la place à l'histoire, qui allait trois ans plus tard sceller à jamais son destin en le propulsant à la tête d'un projet scientifico-militaire sans précédent.

Il ne revint jamais tout à fait à la recherche « civile ». Après la guerre, il prit la tête de l'Institut d'études avancées de Princeton (États-Unis), qui accueillait entre autres Albert Einstein. Il y joua certes un rôle important dans plusieurs avancées majeures en physique, mais plus comme un catalyseur et un organisateur que comme un chercheur à part entière. Son implication dans la politique nucléaire américaine, puis la révocation de son habilitation de sécurité en 1954, en pleine chasse aux sorcières maccarthyste, contribuèrent à l'écarter encore davantage du monde de la recherche théorique. Jouissant toujours d'une grande célébrité, il se consacra pendant les dernières années de sa vie à la vulgarisation et à la diffusion des sciences, ainsi qu'à la philosophie. Il est vrai que la littérature et les humanités l'avaient toujours passionné, presque autant que la physique. ■

RECONNAISSANCE

À un cheveu du Nobel

Quand il décida de confier la direction scientifique du projet Manhattan à Oppenheimer, le général Leslie Groves, qui en assurait la supervision pour l'armée, vit un seul obstacle majeur à sa nomination : il n'était pas « nobélisé ». L'officier craignait que cette lacune le gêne pour mener une équipe de scientifiques formée des plus brillants représentants de leur discipline, dont beaucoup de lauréats du prestigieux prix suédois. Bien qu'il fût pressenti à trois reprises pour remporter le Nobel de physique — en 1946, en 1951 et juste avant sa mort en 1967 —, « Oppie » n'obtint jamais cette distinction. Il a pourtant côtoyé toute sa vie des nobélisés, qui furent soit ses mentors et ses compagnons pendant ses années de formation, soit ses « employés » à Los Alamos, soit encore ses étudiants. Pourquoi passa-t-il ainsi à côté du Nobel ? Une raison vient de la diversité des sujets qu'il a abordés, un éclectisme qui fut à la fois un atout et un handicap. Car s'il explorait tous azimuts, souvent avec brio, il abandonnait souvent un champ de recherches après l'avoir à peine défriché, laissant à d'autres la récolte des résultats, des honneurs et des lauriers. Le contexte politique a pu aussi jouer un rôle. Entre l'ombre de l'arme atomique qui lui restait attachée alors que la menace nucléaire pesait sur le monde et la révélation de ses sympathies communistes en pleine période du maccarthysme, il était sans doute devenu un candidat un peu trop « sulfureux » pour le comité Nobel…

**ÉCONOMISEZ JUSQU'À 40% SUR L'ACHAT DE VOTRE TICKET*
AVEC LE CODE PROMO SA-VT24 JUSQU'AU 04/04 INCLUS**

*Tarif early bird inclus

VIVA TECHNOLOGY

LE PLUS GRAND ÉVÉNEMENT STARTUP ET TECH EN EUROPE

**22-25 MAI
PARIS 2024**

Une nouvelle ère, ça commence déjà par 4 jours.

Les nouvelles technologies révolutionnent nos vies.
A VivaTech, découvrez comment elles vont faire avancer votre business.

**RÉSERVEZ VOTRE BILLET SUR
WWW.VIVATECH.COM**

PUBLICIS GROUPE · Groupe Les Echos Le Parisien · africa news. · euro news. · Bloomberg Media · CGTN · CNN · webedia · BFM BUSINESS

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

▶ C'est à voir
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Le ciel du mois
p. 97

▶ Jeux
p. 98

PATRICE CARTIER/BRIDGEMAN IMAGES

Fossiles d'organismes marins apparus au cambrien (-540 millions d'années).

La fabuleuse aventure de la vie

Le paléontologue britannique Henry Gee dresse un panorama passionnant de 4,6 milliards d'années d'histoire de la Terre.

ÉPOPÉE L'apparition et l'évolution de la vie terrestre sont intimement mêlées à l'histoire de notre planète, à ses soubresauts géologiques et chimiques. Le paléontologue britannique Henry Gee, spécialiste de biologie de l'évolution, en fait la brillante démonstration dans cet ouvrage passionnant. Il y livre le récit de 4,6 milliards d'années d'histoire de la Terre, depuis l'époque où elle était un globe de lave en fusion, continuellement percuté par des astéroïdes, bientôt transformé en monde aquatique. La vie, sous forme de membranes, émergea au milieu de ce tumulte et évolua dans les profondeurs des océans pour donner naissance aux premiers récifs de stromatolithes, qui *« allaient devenir la forme de vie la plus aboutie et durable ayant jamais existé sur cette planète, dont ils demeurèrent les maîtres incontestés pendant 3 milliards d'années »*. Jusqu'à l'apparition des animaux qui allaient les brouter.

Des vagues de peuplement de la planète par une multitude d'espèces toujours plus complexes vont ensuite se succéder et transformer l'environnement terrestre, jusqu'à engendrer de grandes extinctions. Le développement de la photosynthèse, par exemple, a produit des bouffées d'oxygène libre, qui ont brûlé des générations d'organismes vivants, transformé le fer en rouille et le carbone en calcaire, une succession de modifications de l'environnement qui conduit à la glaciation entière de la planète. Chaque extinction majeure sélectionne des survivants qui engendrent des formes de vie de plus en plus complexes, jusqu'à l'apparition d'*Homo sapiens* et sa très récente mainmise sur la planète. *« Quel sera l'héritage de l'humanité ?*, s'interroge Henry Gee. *Comparé à l'évolution de la vie sur Terre : rien. »* Un constat qui devrait nous inciter à prendre à bras-le-corps notre devenir. ■

Sylvie Rouat

Une (très) brève histoire de la vie sur Terre, Henry Gee, JC Lattès, 432 p., 22,90 €

Odyssée universelle

ÉVOLUTION *« J'allais, ENFIN, comprendre les mécanismes de l'essentiel, d'où tout a décollé. »* L'enthousiasme d'Erik Orsenna, dans la préface du livre de l'astrophysicien Jean Audouze et de la biologiste Marie-Christine Maurel, décrit exactement la promesse de celui-ci. Que ce soit pour découvrir, actualiser ou compléter ses connaissances, les deux chercheurs réalisent le tour de force de partir du Big Bang et de la nature atomique de la matière observable pour arriver à l'apparition de la vie et aborder les menaces pesant sur la biodiversité. Un récit dense, mais très accessible. ■ **M. N.**

Du cosmos à la vie, Jean Audouze, Marie-Christine Maurel, L'Archipel, 200 p., 20 €

L'IA, un puits à récits

CONTES Internet et l'intelligence artificielle sont un formidable réservoir d'histoires. Et l'auteure, ancienne de Google Arts & Culture, s'emploie à les raconter. Son livre n'est pas un essai ni une encyclopédie. L'invention du mot « robot » ou l'histoire du Turc mécanique ont des allures de nouvelles, le journal d'un anthropologue explique le référencement Google, un inspecteur Smith fictif parle de reconnaissance d'image et l'éthique de l'IA s'invite à une promenade kantienne. L'approche est originale, stimulante et surtout très agréable à lire. ■ **A. D.**

Fantasia, Laura Sibony, Grasset, 304 p., 22 €

Soldat de l'immunité

MÉMOIRES De sa vocation pour l'immunologie pédiatrique, née en 1969 à l'hôpital Necker (Paris), à son rôle de médiateur scientifique dans la vaccination du Covid-19, Alain Fischer retrace ici son parcours, celui d'un pionnier de la thérapie génique devenu grande figure de la médecine française, académicien et titulaire de la chaire de médecine expérimentale au Collège de France. Il dévoile le cheminement scientifique qui l'a conduit à traiter les fameux « bébés bulle » à la fin des années 1990, avant de cofonder l'institut des maladies génétiques Imagine. ■ **H. J.**

Protéger les vivants, des enfants malades à la crise du Covid, Alain Fischer, Odile Jacob, 336 p., 24,90 €

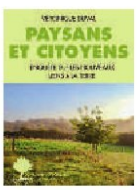
Unités fondamentales

QUANTIFICATION Mètre, seconde, kilogramme, kelvin, ampère, mole et candela : sept unités de mesure fondamentales avec lesquelles nous quantifions tout, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Leurs histoires fascinantes emmènent le lecteur à la découverte des premiers calendriers lunaires il y a 30 000 ans et des pyramides égyptiennes, jusqu'aux systèmes de positionnement par satellite ou à l'enregistrement des changements climatiques actuels. *« L'homme a toujours mesuré le monde. Il le mesure pour mieux l'appréhender et l'explorer, y vivre, interagir avec ses semblables, rendre ou demander justice, entrer en contact avec les divinités »*, rappelle l'auteur, physicien spécialiste de fusion nucléaire. Deux étapes cruciales sont particulièrement développées : la révolution galiléenne, qui introduit la méthode scientifique et la nécessité d'un langage commun — celui de la mesure — pour réaliser des expériences, valider ou réfuter les théories ; et la Révolution française, fondée sur les valeurs d'universalité et d'égalité, qui entend développer pour tous le même système de poids et mesures. ■ **Franck Daninos**

Les Sept Mesures du monde, Piero Martin, Payot, 256 p., 21 €

L'agriculture confisquée

ENQUÊTE Au début des années 1960, les politiques instaurées par Edgar Pisani, ministre de l'Agriculture, vont faire entrer l'agriculture française dans le productivisme et l'exportation. En vingt ans, 659 000 agriculteurs sont invités à raccrocher les sabots. Des millions d'hectares sont remembrés, entraînant des destructions sans précédent des milieux. Depuis les années 2010, la concentration des terres ne cesse d'augmenter, verrouillant leur accès aux jeunes. La journaliste Véronique Duval livre ici une enquête très documentée et éclairante. ■ **S. R.**



Paysans et citoyens, enquête sur les nouveaux liens à la terre, Véronique Duval, Actes Sud, 320 p., 23,50 €

Bataille autour d'un volcan

SOCIOLOGIE Le volcan Mauna Kea, à Hawaii (États-Unis), constitue depuis les années 1960 un haut lieu de l'astronomie. Mais un haut lieu contesté. Car cette montagne, point culminant de l'océan Pacifique (4207 m), est aussi un lieu sacré pour la communauté autochtone. Passionné d'astronomie, l'auteur, sociologue, plonge dans les archives des observatoires, des instituts universitaires, des journaux locaux, etc. Il enquête auprès des différentes parties prenantes (astronomes, populations locales, militants écolos, ouvriers…), afin de raconter la transformation de Mauna Kea en « capitale astronomique du monde ». Surtout, il met en lumière comment la construction des télescopes se fait souvent aux dépens de l'environnement naturel et social. Il invite ainsi à s'interroger sur les conditions de réalisation de la science. Une réflexion critique éclairante. ■ **V. G.**

La Montagne aux étoiles, Pascal Marichalar, La Découverte, 304 p., 22 €

C'EST À LIRE

Dangereuse Islande

MAGMA Méfiez-vous, ce livre vous brûlera les doigts. Car à la narration romanesque d'un amour qui fracasse toute certitude en épousant les

soubresauts de la Terre, se mêlent de bouillonnants chapitres de volcanologie. Nous sommes en Islande, les sismomètres posés sur la dorsale de Reykjanes n'en finissent pas de tressauter... Anna, géologue passionnée, et ses camarades de cauchemars, craignent le réveil d'une hypothétique chambre magmatique aux multiples artères, menaçant de recouvrir de cendres jusqu'à la capitale. ■ **A. De B.**

Éruptions, Amour et autres cataclysmes, Sigrídur Hagalín Björnsdóttir, Gaïa, 336 p., 23 €

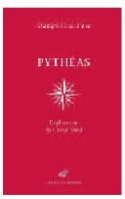
Fausses légendes

DÉMONSTRATION Dans son nouveau livre, Antoine Houlou-Garcia, chercheur associé à l'École des hautes études en sciences sociales à Paris et fondateur de la chaîne YouTube Arithm'Antique, déconstruit un certain nombre de fausses légendes, souvent rattachées à l'histoire des sciences. Parmi les plus connues : l'idée de la pomme qui serait tombée d'un arbre sur la tête de Newton, Einstein qui n'aurait pas été si doué en mathématiques, ou le Moyen Âge qui aurait été la période sombre des sciences durant laquelle tout le monde pensait la Terre plate… Ou encore : Thalès et Pythagore qui auraient inventé les premiers les théorèmes qui portent aujourd'hui leur nom, etc. Mais en fouillant bien, il n'en est rien. Préparez-vous à réviser les histoires que vous avez pu entendre, grâce à une lecture accessible et un travail de recherche rigoureux et riche de sources primaires écrites par des auteurs, romanciers et biographes. Les pommes ne tombent pas du ciel, les génies non plus ! ■ **Marine Laplace**

Et la pomme ne tomba pas sur la tête de Newton..., Antoine Houlou-Garcia, Albin Michel, 272 p., 17,90 €

Mystérieux Pythéas

PORTRAIT Au IVe siècle avant notre ère, l'astronome grec Pythéas, de Marseille, a laissé son nom dans l'histoire grâce à son traité géographique *De l'Océan*, aujourd'hui disparu mais dont il reste des bribes et



commentaires chez d'autres auteurs. Nombre d'historiens ont tenté de retracer son périple maritime vers le nord de l'Europe, où il décrit l'Armorique, la Grande-Bretagne et, dans les régions boréales, la mystérieuse île de Thulé. Ce grand explorateur a aussi élaboré une théorie des marées et précisé la position du pôle céleste. ■ **S. R.**

Pythéas, explorateur du Grand Nord, François Herbaux, Les Belles Lettres, 248 p., 17,90 €

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 917/918 ❑ N° 919 ❑ N° 920 ❑ N° 921
❑ N° 922 ❑ N° 923 ❑ N° 924 ❑ N° 925

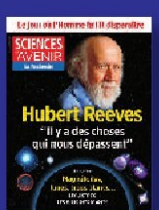
Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

N° 917/918 Spécial Eau

N° 919 Découvertes sur Alzheimer et Parkinson

N° 920 L'origine du temps

N° 921 Aliments et santé



N° 922 Hommage à Hubert Reeves

N° 923 L'évangile oublié qui bouleverse la Bible

N° 924 Dépression : les nouvelles pistes pour s'en sortir

N° 925 Énergie noire : la force qui déchire l'Univers

PATRICE NIN/QUAI DES SAVOIRS

Des ateliers interactifs sont proposés (ici la reconnaissance d'objets sur des images satellite).

Toulouse (31) / Exposition

IA, double je

« Fête en banlieue »… À partir de cet intitulé, l'outil d'intelligence artificielle (IA) générative Midjourney a créé l'image d'un attroupement autour d'un fourgon en flammes. Pour l'IA, la banlieue est donc synonyme d'émeutes et de danger. En présentant d'emblée cette image sur écran géant, cette exposition pose son enjeu : *« Elle vise à exercer notre esprit critique face aux machines et à leurs biais »*, explique Laurent Chicoineau, directeur du Quai des Savoirs. Comment fonctionne l'IA, avec quoi est-elle alimentée, quel rapport avons-nous avec elle? Dans une scénographie interactive, le visiteur est invité à expérimenter et à tester les limites de l'IA. Ces technologies peuvent servir à reconnaître des décharges sauvages sur une image satellite ou à repérer des tumeurs mammaires sur des clichés d'imagerie médicale. D'un autre côté, la reconnaissance faciale a des ressorts très opaques, à l'image de la voiture autonome qui apporte son lot de dilemmes éthiques. On quitte les lieux avec beaucoup plus de questions que de réponses, et c'est bien le but recherché. (Lire notre reportage : sciav.fr/926doubleje) ■ **Jean-François Haït**

Quai des Savoirs, allée Matilda, jusqu'au 3 novembre. Rens. : 05.67.73.84.84.

Alise-Sainte-Reine (21)

Ô sports, des jeux pour des dieux
L'histoire des jeux Olympiques est racontée à travers les écrits de l'époque, mais aussi à l'aide des statues, vases, pièces de monnaie et autres outils issus de fouilles archéologiques.
MuséoParc Alésia, 1, route des Trois-Ormeaux, jusqu'au 30 novembre. Rens. : 03.80.96.96.23.

Lewarde (59)

La conquête de l'Ouest, la découverte du charbon dans le Pas-de-Calais
Alors que l'on pensait la veine épuisée, un prolongement du gisement de charbon du Pas-de-Calais est découvert entre 1841 et 1847. Et la région devient le premier bassin houiller français.
Centre historique minier, fosse Delloye, rue d'Erchin, jusqu'au 11 novembre. Rens. : 03.27.95.82.82.

Lyon (69)

Épidémies, prendre soin du vivant
En revenant sur l'histoire de quelques épidémies ayant touché les sociétés humaines depuis l'Antiquité, ce parcours aborde leur dimension biologique autant que sociale.
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 16 février 2025. Rens. : 04.28.38.12.12.

Marcy-l'Étoile (69)

Musée de sciences biologiques Docteur-Mérieux
Dédié à la microbiologie, à la lutte contre les maladies infectieuses et à une famille d'entrepreneurs scientifiques, les Mérieux, le musée a rouvert en février après une rénovation de son parcours.
309, avenue Jean-Colomb. Rens. : 04.37.20.01.01.

Paris (75)

Précieux déchets
L'eau, le sol, l'air sont empoisonnés par deux milliards de déchets générés chaque année dans le monde. Cette exposition permet une prise de conscience, mais ouvre également des perspectives sur la valeur de ces mêmes déchets.
Lire notre reportage : sciav.fr/925dechet
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 1er septembre. Rens. : 01.85.53.99.74.

L'Égypte des pharaons, de Kheops à Ramsès II
Sous forme de projections, ce spectacle fait admirer des bas-reliefs, des peintures et des papyrus témoignant de la vie quotidienne en Égypte antique. Avec la construction des pyramides comme moment clef.
Atelier des Lumières, 38, rue Saint-Maur, jusqu'au 5 janvier 2025. Rens. : 01.80.98.46.00.

Saint-Germain-en-Laye (78)

D'un monde à l'autre. Autun de l'Antiquité au Moyen Âge
L'histoire de la ville est retracée sur mille ans. Capitale intellectuelle et économique des Éduens, elle devient centrale dans le monde chrétien.
Musée d'archéologie nationale, château, place Charles-de-Gaulle, jusqu'au 17 juin. Rens. : 01.39.10.13.00.

PARTENARIAT

Paris (75)

Festival Sciences pour tous
Des éditeurs et auteurs de livres de vulgarisation scientifique viennent parler de leur passion et de leur mission. À savoir diffuser la connaissance sur un domaine scientifique donné, faire comprendre une technique et ses enjeux.
Musée des Arts et Métiers, 60, rue Réaumur, 12 et 13 avril. Réservation obligatoire. Rens. : sciav.fr/925sciences

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

De la nécessité de la culture pour parler climat

Comment passer à l'action pour le climat ? Comment définir, adopter, embarquer le plus grand nombre dans des visions transformatives de nos modes de vie et de nos organisations sociétales ? Comment mieux anticiper et s'adapter aux risques climatiques futurs que désormais nous connaissons bien, tout en nous sevrant de notre dépendance individuelle et collective aux énergies fossiles ? Les formations aux enjeux climat et biodiversité se multiplient à la fois dans les écoles et les universités, mais aussi dans le cadre de la formation continue auprès de tout public. Mais la seule connaissance des enjeux ne suffit pas à enclencher l'action. Les chiffres restent désincarnés et n'aident pas à se représenter le monde de demain, celui à +3 °C de réchauffement global vers lequel nous nous dirigeons, ni celui d'une société bas carbone qui aurait réussi sa métamorphose. Convoquer la culture est une nécessité. Pièces de théâtre, romans d'anticipation, BD, expositions photos, séries télévisées, etc. permettent d'incarner des mondes, de solliciter nos émotions et nos imaginaires. La verve de l'humoriste, le coup de crayon du dessinateur de BD, l'œil du photographe qui partage sa solastalgie et concrétise par son regard une éco-anxiété diffuse, sont des vecteurs cathartiques et exploratoires pour le monde actuel et à venir. Ils sont des regards réflexifs sur « qui nous sommes », et des regards créateurs sur « qui nous voulons devenir ». Scientifiques et artistes travaillent de plus en plus ensemble. Dynamique formidable de décloisonnement des esprits et, pour les chercheurs, les regards croisés sur leurs objets d'étude sont à chaque fois émancipateurs. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

En lisant Wikipédia...

Pouvez-vous positionner des points dans le plan, pas tous sur une même ligne, de façon qu'ils soient tous à distance entière les uns des autres ? Avec trois points, il suffit de les mettre aux coins d'un triangle équilatéral de côté 1. Avec quatre points, il faut déjà réfléchir. Le carré dont le côté vaut 1 ne marche pas car les coins diagonalement opposés sont à distance √2 l'un de l'autre ! Mais une solution existe : il suffit de former un losange en collant ensemble quatre triangles rectangles de côtés 3-4-5. En fait, il y a toujours une solution, que le nombre de points à placer soit 3, 4, 10, 100 ou 1000… Mais cette propriété n'est plus vraie pour un nombre infini de points ! C'est le théorème d'Erdös-Anning qui date de 1945 : si on a un ensemble infini de points dans le plan qui sont tous à distance entière les uns des autres, alors ces points sont forcément alignés. Le chercheur américain David Eppstein passe son temps libre à peaufiner des articles sur Wikipédia, et c'est en travaillant sur l'article qui explique ce théorème qu'il s'est demandé : que se passe-t-il si on généralise la question en utilisant non pas la distance euclidienne habituelle, mais une métrique non euclidienne ? Et cela a conduit à un travail de recherche, puis à un article scientifique*. On voit là un exemple de la façon dont la recherche se fait. Recherche non finalisée, certes. Mais cela conduit à comprendre en profondeur les propriétés qui sous-tendent la preuve, et donc à faire avancer la connaissance. ■

* sciav.fr/926theoreme

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Au-delà des errements de ChatGPT, quel avenir pour l'IA ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

BRUNO LÉVY

Les seize derniers mois ont été marqués par le déploiement massif de l'intelligence artificielle générative. Tous ou presque ont pu se faire une opinion, soit par expérience personnelle, après avoir téléchargé ChatGPT, soit par ouï-dire. Beaucoup furent éblouis. Et, il est vrai que les prouesses du « chat » impressionnent : il donne le change à toute sollicitation avec aplomb, sans erreur de syntaxe ni faute d'orthographe. Il arrive parfois qu'il commette des erreurs manifestes. Ainsi, dans une chronique récente, l'informaticien Jean-Paul Delahaye indique qu'à la question « Quels sont les nombres premiers multiples de 3 entre 100 et 200 ? », une de ses versions aurait répondu : *« Il n'y a qu'un nombre premier multiple de 3 entre 100 et 200, c'est 101. Tous les autres multiples de 3 entre 100 et 200 sont divisibles par 2, ce qui les rend composés. »* Et, à la requête « Elvire arrive après Léandre. Valère était déjà là quand Elvire est arrivée. Léandre était-il présent quand Valère est arrivé ? », j'ai obtenu, sur sa version 3.5 : *« Oui, Léandre était présent quand Valère est arrivé »*, et sur la version 4 : *« Non, Léandre n'était pas présent quand Valère est arrivé, car Elvire est arrivée après lui »*… Au vu de ces errements, on est en droit de se demander si la capacité de ces outils à générer des textes bien construits et plausibles constitue un vrai progrès scientifique. Nous aideront-ils dans la quête de vérité qui est l'objet de toute science authentique ? Certains affirment qu'ils révolutionneront la conception des médicaments et donneront sens à toutes sortes de données séquentielles comme aux structures de protéines, aux dossiers médicaux ou aux prévisions météorologiques, voire aux événements de la vie afin de prédire l'âge de la mort, ainsi que le prétend un article récent paru dans la revue *Nature Computational Science*. Saura-t-on concilier ces annonces fabuleuses avec les piètres résultats observés ? Puissent les mois qui viennent nous aider à y voir plus clair ! Mais, pour l'heure, je conseille au lecteur d'attendre encore un peu avant de donner sa langue au chat GPT… ■

L'ŒIL DE LASCAR

Le plan EcoPhyto avait pour objectif de réduire de 50 % l'usage des pesticides d'ici à 2030. La fronde des agriculteurs l'a mis sur pause : il a été suspendu le 1er février par le Premier ministre. Cette décision a suscité la colère et l'inquiétude des experts, à l'instar du chercheur au CNRS Mathieu Lihoreau qui évoque un *« non-sens scientifique, un retour en arrière alarmant »*. EcoPhyto avait notamment pour ambition d'accompagner les agriculteurs dans la transition écologique : celle-ci attendra. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

PHYSIOLOGIE

Les hommes transpirent-ils plus que les femmes ?

Manon P.

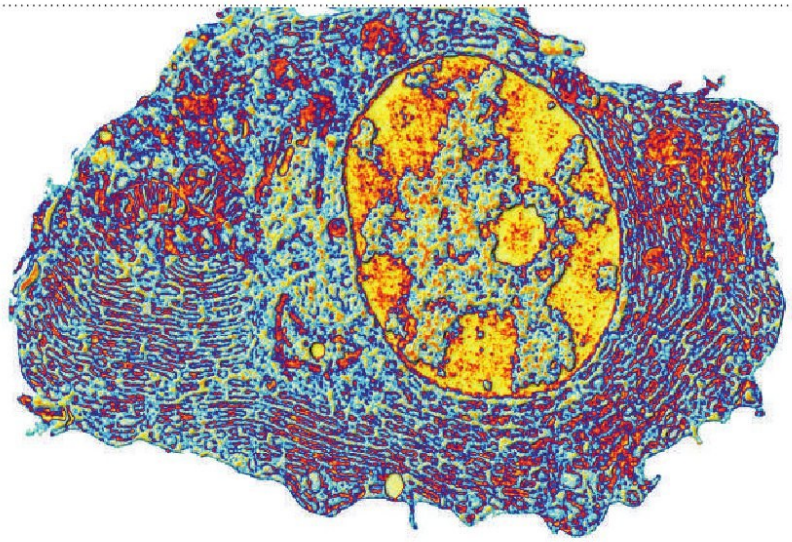
Non, le sexe de l'individu n'a pas d'influence sur la transpiration. *« Cette dernière dépend en réalité de la taille et de la forme du corps »*, tranchent des scientifiques de l'université de Wollongong (Australie) en 2017. Lors d'une activité physique, le corps se refroidit de deux façons : par la transpiration et par une hausse de la circulation sanguine à la surface de la peau. Les individus plus grands que la moyenne ont davantage tendance à évacuer l'excès de chaleur par la transpiration. Les plus petits, tout comme ceux ayant une plus grande surface par kilogramme de masse corporelle, subissent plutôt une hausse de la circulation sanguine à la surface de leur peau. ■ **Lise Loumé**

ZOOLOGIE

Comment le dromadaire peut-il manger des cactus sans se blesser ?

Maël L.

« *La bouche du dromadaire est pourvue de papilles composées de kératine, la même protéine que celle constituant nos cheveux et ongles, rendant l'animal insensible aux épines quand il mange des cactus* », explique Bernard Faye, chercheur au Cirad. Ces papilles recouvrent un tissu conjonctif très dense assurant la résistance de la muqueuse buccale, qui tapisse tout l'intérieur de la bouche. *« De plus, le dromadaire possède 34 dents suffisamment robustes pour broyer les tiges coriaces des cactus »*, ajoute le spécialiste. ■ **Anne-Sophie Tassart**



ALFRED PASIEKA/SPL/SUCRÉSALÉ

Le noyau (au centre, en jaune) de chaque cellule d'un humain contient son ADN.

BIOLOGIE

Toutes nos cellules ont-elles le même ADN ?

Pablo L.

Le corps humain est constitué de milliards de cellules qui contiennent dans leur noyau 46 chromosomes. Portant nos gènes, ils sont composés d'ADN (acide désoxyribonucléique). *« Nos cellules comportent le même ADN d'un point de vue chimique, à quelques mutations près*, explique Pierre Netter, généticien et professeur émérite à Sorbonne Université. *Il y a toujours quelques rares mutations, dont le taux est extrêmement faible : d'environ 1 pour 1 milliard. Et heureusement, sinon cela mènerait à des catastrophes ! »* Les rares mutations peuvent entraîner l'apparition de maladies, comme des cancers ou la trisomie 21 liée à l'apparition d'un nombre anormal de chromosomes 21 au moment de la fécondation. Toutefois, il existe deux types de cellules échappant à cette règle générale. D'une part, les gamètes (cellules sexuelles), qui ne portent chacun que 23 chromosomes uniques. Ces derniers sont assemblés à partir d'un mélange aléatoire des gènes de chaque paire de chromosomes contenue dans les cellules qui produisent les gamètes. D'autre part, les immunoglobulines, des anticorps incontournables de notre système immunitaire. *« Ces cellules sont uniques car leurs gènes, contenus dans leurs noyaux, peuvent se recombiner, grâce à des cassures et des fusions entre différentes régions de chromosomes distantes au départ »*, précise le spécialiste. Un phénomène qui permet une extraordinaire diversité génétique des anticorps, nécessaire pour lutter contre les bactéries et virus. Ces recombinaisons dans les immunoglobulines sont irréversibles et resteront gravées dans la mémoire de l'organisme. ■ **Coralie Lemke**

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète passe en conjonction inférieure le 12 et n'est pas perceptible ce mois sous nos latitudes.

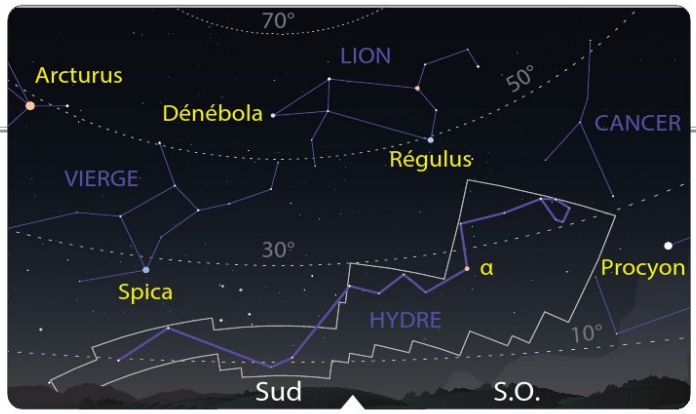
VÉNUS À deux mois de son passage en conjonction supérieure, l'étoile du Berger n'est déjà plus visible, beaucoup trop proche de la direction de l'astre du jour.

MARS Bien que la planète Rouge s'éloigne progressivement de la direction du Soleil, elle ne se trouve pas dans de bonnes conditions d'observation. Encore peu brillante, elle pâtit d'un écliptique peu relevé le matin. À oublier !... pour le moment.

JUPITER Très brillante, la plus massive des planètes est visible en soirée vers l'ouest, mais elle se couche de plus en plus tôt. Le 1er, elle disparaîtra sous l'horizon 3 h environ après le Soleil, mais ne le fera que 1 h après lui le 30. Elle quittera le Bélier le 28 et entrera alors dans le Taureau, constellation dans laquelle elle résidera jusqu'en juin 2025. Jupiter sera en conjonction avec le Soleil le 18 mai.

SATURNE La planète aux anneaux n'est pas mieux lotie que Mars et peine à prendre de la hauteur en fin de nuit. Elle se lève 1 h 40 min avant le Soleil en toute fin de mois. On trouve Saturne dans la constellation du Verseau.

STAR WALK 2 est une application gratuite en français pour Android et iOS, avec achats intégrés. Elle fournit l'aspect du ciel en temps réel, permet d'identifier et de trouver étoiles et planètes grâce à la réalité virtuelle, propose des informations détaillées sur les corps célestes et une rubrique actualités.

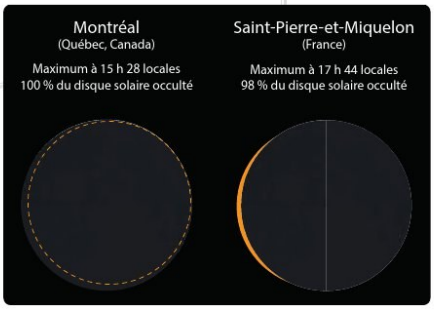


Aspect du ciel en milieu de mois, vers minuit. L'Hydre est alors observable dans sa totalité.

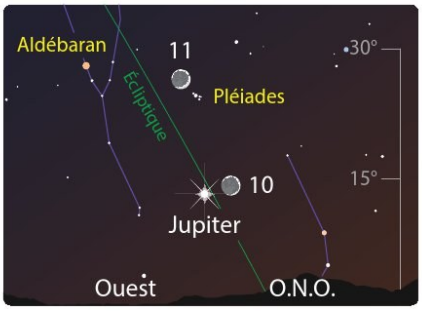
L'Hydre, la plus grande des constellations

SA SURFACE OCCUPE PLUS DE 3 % DE LA SPHÈRE CÉLESTE, ce qui fait de l'Hydre la plus grande des 88 constellations. Peu connue, elle ne contient qu'une étoile relativement brillante : la géante orangée Alphard (α), dont la luminosité est proche de celle de l'étoile Polaire.

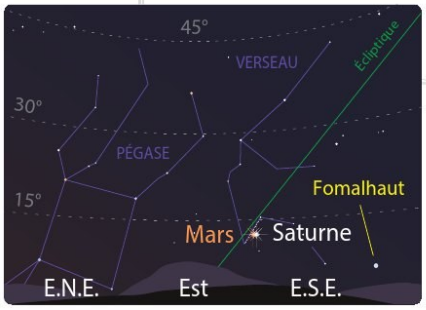
Notre conseil L'Hydre serpente sous deux constellations printanières facilement repérables, le Lion et la Vierge. Comme elle est toujours assez basse dans notre ciel, il convient d'avoir un horizon sud bien dégagé pour la découvrir dans son intégralité.



LE 8, L'ÉCLIPSE sera totale à Montréal (Canada). L'ombre de la Lune passera ensuite à moins de 100 km au nord de Saint-Pierre-et-Miquelon, où l'éclipse de Soleil sera partielle, à 98 %.



LE 10, 1 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, la Lune en croissant sera à un peu plus de 3° de la planète Jupiter et le lendemain, à 3° de l'amas d'étoiles des Pléiades.



LE MATIN DU 11, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, admirez depuis la Martinique ou la Guadeloupe le rapprochement serré (un demi-degré) entre les planètes Mars et Saturne.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel d'avril

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

▸ Multiples au centuple

Trouverez-vous les inconnues x et y propres à satisfaire cette équation ?

$\frac{1}{2}(6x + 7y) = 100$

▸ Comme un mardi

Quel dicton se cache dans cette phrase ?

Quel pur antiride devient cher le mardi ?

▸ Logique au sommet

Trois industriels très occupés font le point pour tenter de jouer au golf ensemble une fois par semaine entre le lundi et le vendredi.

- Arthur Martin est en séminaire tous les mardis et Benoît Décamps est au bridge à partir du jeudi.
- Si Charles Autisse vient le mercredi, c'est pour aller à la piscine.
- Si Arthur Martin ne va pas à la piscine le vendredi, il y va le lundi.
- Tous les trois jouent désormais au bridge le vendredi.

Quel jour pourront-ils jouer au golf ensemble ?

▸ Matoku

Placez un entier de 1 à 8 dans chaque case, tous différents sur chaque ligne et chaque colonne.

Dans une zone de couleur, + indique la somme, - la soustraction, x le produit, M la moyenne, / la division, S une suite sans ordre, sinon c'est le nombre lui-même.

32x		S			3M		
		22+		2-		4M	
20+				2	30+		
		448x					84x
			S		23+		
21+							
	2/					1280x	
			1-				

▸ Quel est l'intrus ?

Ficeler

Appeler

Celer

Atteler

Renouveler

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 925, mars 2024

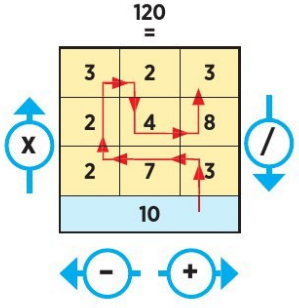
▸ Auto références

1 **3**	6 **1**	1	8	8
2 **7**	7 **3**	0	2	4
3 **2**	8 **2**	2	7	2
4 **4**	9 **0**	7	2	4
5 **1**	0 **2**	4	6	5

▸ Labyrinth-métique

10 x 3 = 30
30 - 7 - 2 = 21
21 x 2 = 42
42 x 3 = 126

126 + 2 = 128
128/4 = 32
32 + 8 = 40
40 x 3 = 120



▸ Authentique néant

7456 + 7456 = 14912

▸ Des mots rougissent

... quand ils contiennent au moins deux consonnes et qu'elles apparaissent dans l'ordre alphabétique.

▸ Chiffres en grille

8 + 3 + 5 + 4 + 2 + 7 + 6 + 1 = 36

3	8	9
5	1	6
4	2	7

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LABORATOIRES ILAPHARM

Pour une santé chaque jour renforcée !

A vos côtés, pour votre santé !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5 €**

Entreprise familiale française depuis 1992, nous vous proposons le meilleur des plantes pour une santé chaque jour renforcée.

* *Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

CODE PRIVILÈGE : **CS450**

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables.**

6 € 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3).*

5 € 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids.** *(1), (2), (5).*

6 € 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel.** Idéal avec le Safran !

7 € 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

7 € 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences.** *(1), (11).*

6 € 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie.** Pour un **bon confort urinaire.**

7 € 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux.** *(6), (8).*
Allergène : **poisson.**

5 € 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(7).*

6 € 30 gélules

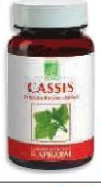
Érection
SAFRAN BIO

Le Safran participe au maintien de la **fonction érectile.** Idéal avec la Maca ! *(2), (4).*

7 € 20 gélules

Draineur
CASSIS BIO

Drainez votre corps : le Cassis **favorise l'élimination de l'eau.**



6 € 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie.**

6 € 10 ampoules ~~15,60€~~ *(1), (2), (9).*

Endurance et puissance
TRIBULUS

Il favorise la **capacité** et les **performances sexuelles.** *(2), (10).*

6 € 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité.** Ni accoutumance, ni somnolence.

6 € 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5 € 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(1), (9).*

6 € 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

L'Eau de Cologne "CHYPRE"

OFFERTE

Eau de cologne fraîche, aux notes orangées et légèrement épicées, qui conviendra autant aux femmes qu'aux hommes. Fabriquée en France par la parfumerie Jardin de France. Contenance 95 ml.

Les Frais de Port
Dès 15€ d'achat **OFFERTS**

0 € *Au lieu de ~~6,50€~~*

dès 5 € TOUS VOS PRODUITS EXEMPLE :

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	7,00€
Safran BIO	7,00€
Maca BIO	7,00€
L'Eau de Cologne "Chypre"	OFFERTE
Frais de port	OFFERTS
TOTAL	**32,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. (11) Espacez la prise de vos médicaments d'au moins 2 heures. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

BON DE COMMANDE - COMMANDE FACILE SUR WWW.ILAPHARM.COM

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|

E-mail : .....

pour recevoir les **offres des partenaires des Laboratoires ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

**Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_| |_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		7€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		7€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		7€	
Cassis BIO	PCAB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** mon **Eau de Cologne "Chypre"** et mon **Catalogue**				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur les frais de port**				OFFERTS
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de port**				
CODE PRIVILÈGE : **CS450**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **règlement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste 72h

SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

Par téléphone :

01 49 09 11 11

Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Par courrier :

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

S.E.V. VOLVIC - R.C.S. : 395 780 059 - Clermont-Ferrand

GOÛTEZ À LA FORCE DE LA NATURE

C'est parce qu'elle est filtrée pendant 5 ans à travers 6 couches de roches volcaniques que Volvic a un goût aussi unique.